

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ **Анатолій ОРЛОВ**  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломна робота**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: Визначення основних електрофізичних параметрів структур метал-діелектрик-напівпровідник за вольт-фарадними характеристиками.

Виконав : студент 4 курсу, групи ДП-61  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ **Абраїмов Олексій Валерійович** \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник асс. Королевич Л.М. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.  
\_\_\_\_\_ **Георгій СВЄЧНИКОВ** \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

## Завдання на дипломну роботу

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет \_\_\_\_\_ Електроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153 Мікро- та наносистемна техніка \_\_\_\_\_  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій ОРЛОВ  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

### ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

Абраїмов Олексій Валерійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Визначення основних електрофізичних параметрів  
структур метал-діелектрик-напівпровідник за вольт-фарадними  
характеристиками. \_\_\_\_\_

керівник проекту (роботи) асс. Королевич Л.М. \_\_\_\_\_ ,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): 1) Класична теорія структур метал-діелектрик-напівпровідник(МДН); 2) методика визначення параметрів за вольт-фарадними характеристиками(ВФХ); 3) аналіз впливу зарядових станів на ВФХ МДН-структури; 4) методи визначення зарядових станів МДН-структури; 5) розробка методу визначення зарядових станів на межі діелектрик-напівпровідник.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

\_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 60 сторінках, що містять 4 розділи, 28 ілюстрацій, 20 джерел посилань.

Об'єктом дослідження є вольт-фарадні характеристики структури метал-діелектрик-напівпровідник. Предметом є порівняння результатів дослідження електрофізичних параметрів за ВФХ відомими методами.

Метою роботи є порівняння відомих методів визначення електрофізичних параметрів МДН-структури.

Перший розділ присвячений основним поняттям та процесам, що спостерігаються в МДН-структурі. Визначено поняття ідеальної МДН-структури, порогової напруги, напруги плоских зон. Проведено невелику характеристику high-k матеріалів.

У другому розділі розглянута методика визначення параметрів структури за класичним методом та проведене їх експериментальне дослідження.

У третьому розділі обґрунтовано вплив зарядових станів на ВФХ системи. Проведено аналіз зарядових станів, що виникають на напівпровіднику.

Четвертий розділ присвячений проведенню експерименту для дослідження розподілу заряду на межі розподілу діелектрик-напівпровідник різними методами.

Ключові слова: мдн-структура, вфх, поверхневі стани, напруга плоских зон, розподіл заряду на межі діелектрик-напівпровідник.

## ANNOTATION

The work is present on 60 pages, it contains 4 sections, 28 illustrations, 20 sources in the list of references.

The object of study is the capacitance-voltage characteristics of the metal-insulator-semiconductor structure. The subject is a comparison of the results of the study of electrophysical parameters by the C-V characteristics by known methods.

The purpose of the work is comparison of known methods for determining the electrophysical parameters of MIS structures.

The first section is devoted to the basic concepts and processes that are observed in the MIS structure. The concept of an ideal MIS structure, threshold voltage, voltage of flat zones is defined. A small characterization of high-k materials is made.

In the second section, we consider the methodology for determining the structure parameters by the classical method and carry out their experimental study.

The third section substantiates the effect of charge states on the C-V characteristics of a system. The analysis of charge states arising on a semiconductor is carried out.

The fourth section is devoted to an experiment to study the charge distribution at the insulator-semiconductor interface by various methods.

Key words: MIS structure, CV characteristics, surface states, voltage of planar zones, charge distribution at the insulator-semiconductor interface.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП .....	9
1.КЛАСИЧНА ТЕОРІЯ МДН-СТРУКТУРИ.....	11
1.1 ІДЕАЛЬНА МДН-СТРУКТУРА. ЕФЕКТ ПОЛЯ.....	11
1.2. ТЕОРІЯ ЄМНОСТІ МДН-СТРУКТУРИ .....	15
1.3. ПОРОГОВА НАПРУГА ТА ЄМНІСТЬ.....	19
1.4. HIGH-K ДІЕЛЕКТРИКИ .....	22
2.МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МДН-СТРУКТУР ЗА ВФХ. 27	
2.1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МДН-СТРУКТУРИ ЗА ВФХ КЛАСИЧНИМ МЕТОДОМ .....	27
2.2. МЕТОД ТЕРМАНА .....	32
3. АНАЛІЗ ЗАРЯДОВИХ СТАНІВ МДН-СТРУКТУРИ ЗА ВФХ.....	35
3.1. ВПЛИВ ЗАРЯДУ НА ВФХ МДН-СТРУКТУРИ .....	35
3.2. МОДЕЛЬ МДН-СТРУКТУРИ У ВИГЛЯДІ КОНДЕНСАТОРНОЇ СИСТЕМИ .....	39
3.3. АНАЛІЗ ПОВЕРХНЕВИХ СТАНІВ МДН-СТРУКТУРИ .....	42
4. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ КРЕМНІЙ-ДІОКСИД КРЕМНІЯ- АЛЮМІНІЙ .....	44
4.1. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	44
4.2. АНАЛІЗ ВФХ СТРУКТУРИ ЗА МЕТОДОМ ТЕРМАНА.....	47
4.3. ЗНАХОДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МНД-СТРУКТУРИ БЕЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ КРИВИХ.....	53
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	59

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник

ПС – поверхневі стани

ВФХ – вольт-фарадна характеристика

МОН – метал-оксид-напівпровідник

ІМС – інтегральні мікросхеми

ПЗ – просторовий заряд

ОПЗ – область просторового заряду

$\psi_s$  – поверхневий потенціал

$k$  – постійна Больцмана

$T$  – абсолютна температура

$\varphi$  – електростатичний потенціал напівпровідника

$E_F$  - енергія Фермі

$q$  – елементарний електричний заряд

$p_0$  – концентрація дірок

$N_A$ - концентрація акцепторів

$W_m$  – ширина збідненої області

$C_D$  - ємність діелектрика

$C_{FB}$ - ємність плоских зон

$C_{sc}$  - ємність ОПЗ

$C_{ss}$  - ємність поверхневих станів

$N_{ss}$  - щільність поверхневих станів

$L_{Deff}$  - Дабаївська довжина

$\epsilon_0$  - діелектрична проникність вакууму

$\epsilon_s$  - відносна діелектрична проникність напівпровідника

$V_g$  - напруга на затворі

$V_T$ - порогова напруга

$V_{FB}$ - напруга плоских зон

$\varphi_{ms}$  – контактна різниця потенціалів.

$N_{it}$  – щільність заряду на межі діелектрик-напівпровідник



## ВСТУП

Давно вже відомі нам структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) вперше використовувались в якості ємності, якою можна керувати за допомогою напруги. Трохи пізніше, коли МДН-структури почали застосовуватись задля дослідження електронних процесів в межі діелектрик-напівпровідник, був винайдений перший польовий транзистор на основі МДН-структури (зараз мають назви: МДН-транзистор, польовий транзистор з ізольованим затвором). Відомо, що МДН-структури мають три режими роботи: на власній провідності напівпровідника (збагачення або акумуляція), на змішаній провідності (режим слабкої інверсії) та на інверсній провідності (режим сильної інверсії).

Системи метал-діелектрик-напівпровідник набули досить широкого розповсюдження в напівпровідникових приладах, тому пристрої на базі МДН-структур можуть виконувати аналогічні біполярним транзисторам функції: підсилення, генерація, перетворення; функції резисторів, конденсаторів з керованими номіналами; функції запам'ятовуючих пристроїв: обробка, зберігання та логічні операції над інформацією.

Найважливіша відмінність МДН-структури від інших типів в тому, що постійний струм в такій структурі не протікає, а ізолюючий шар не допускає струму «ємнісної природи».

МДН-структури широко застосовуються для виготовлення фотоприймачів, сенсорів та перетворювачів. Широкого застосування набули ІМС розроблені на МДН-транзисторах, такі мікросхеми досить легкі у виготовленні та мають нехитру конструкцію, а що найголовніше — не потребують додаткової ізоляції компонентів схеми. Зараз планарні структури, такі як діелектрик-напівпровідник, МДН, або ж ще складніші, використовують не тільки при конструюванні ІМС, а й в дискретних приладах.

Сучасне використання структури метал-діелектрик-напівпровідник базується на властивостях розподілу останніх двох сполук (діелектрик-напівпровідник), а точніше існування на такій границі розподілу заряду поверхневих станів. Процеси, що можливо спостерігати на поверхні напівпровідника та на його границі розподілу з діелектриком, є основою роботи деяких напівпровідникових пристроїв. До таких відносяться МДН-транзистори, ІС, варикапи на основі МДН-структур та інші[9].

Наразі вивчаються нанопереходи МДН-структур для забезпечення швидкого виділення водорода в фотоелектрохімічних комірках, фотоелектричні елементи, основані на базі МДН-структур[13].

Іноземні вчені вивчають сонячні елементи, що побудовані з використанням МДН-структур, в статті [14] проводиться аналіз впливу станів пасток на перехідний струм в системі, що дозволить трохи розширити використання МДН-структур в цій області.

# 1. КЛАСИЧНА ТЕОРІЯ МДН-СТРУКТУРИ

## 1.1 Ідеальна МДН-структура. Ефект Поля

МДН-структура представляє собою структуру, що утворена пластиною напівпровідника (підкладка), на планарній поверхні якого утворений тонкий шар діелектрику поверх якого знаходиться металічний електрод (затвор). На зворотній стороні напівпровідника розташовується омичний контакт у вигляді металічного електрода. Найрозповсюдженішим напівпровідником є монокристалічний Si, який в основному й використовують в якості напівпровідника в МДН-структурах (рис 1.1). За діелектрик найчастіше використовують діоксид ( $\text{SiO}_2$ ) або нітрид кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Товщини такого шару діелектрику лежать в межах від 15 до 2000 Å. Тонкі шари (15-20 Å) використовують в МНОП-структурах (метал-нітрид-оксид-напівпровідник), які придатні для виготовлення елементів пам'яті. Шари з товщиною 100-150 Å використовують для створення польових транзисторів з тонким підзатворним діелектриком[7].

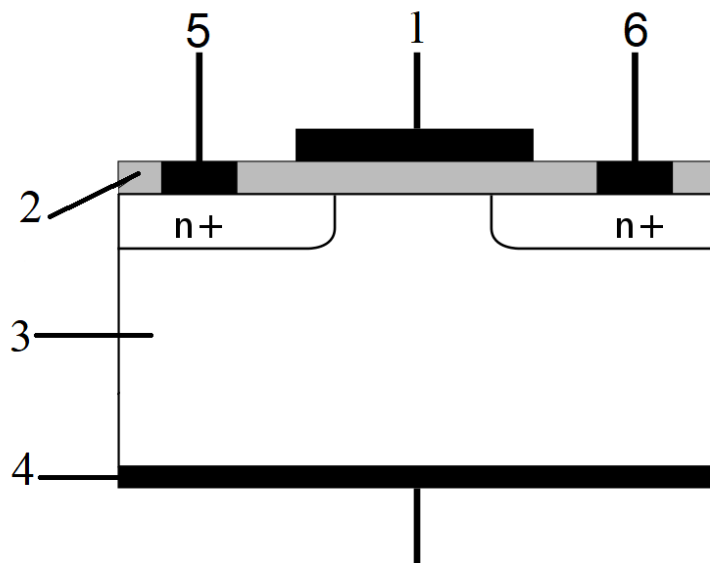


Рис 1.1 МДН-структура. 1 – затвор, 2- підзатворний діелектрик, 3- підкладка з напівпровідника, 4 – контакт до підкладки, 5 – витік, 6 – стік [2]

Лінійні розміри таких структур вздовж поверхні напівпровідника можуть складати як декілька нанометрів, так і кілька міліметрів. Для теоретичних даних зазвичай використовують поняття «ідеальна МДН-структура», яку можна вважати такою при володінні наступними параметрами[7]:

- 1) Термодинамічні роботи виходу електронів при переході з металу та напівпровідника однакові ( $X_m = X_n$ ). Ця властивість дає розуміння, що коли відсутня напруга з зовнішніх джерел, тоді система спостерігається в стані плоских зон, тобто енергетичні зони напівпровідника не мають початкового згину.
- 2) За будь-яких зміщень по напрузі в МДН-структурі можуть існувати лише заряд в напівпровідниковій підкладці та заряд рівний йому за значенням, але протилежний по полярності в польовому електроді. Такої умови можливо досягти при відсутності заряджених центрів у шарі діелектрика та відсутності поверхневих станів на границі розподілу діелектрик-напівпровідник.
- 3) Опір діелектрика надзвичайно великий до будь-якого постійного струму. Тобто при прикладанні напруги будь-якої величини через діелектрик не виникає переносу носіїв заряду.

Енергетичні діаграми ідеальної МДП-структур (при прикладанні напруги  $U = 0$  В) можна спостерігати на рис 1.2.

Перед початком розгляду енергетичних діаграм слід зазначити, що ефект поля – явище зміни концентрації вільних носіїв заряду під впливом джерел зовнішнього електричного поля[1].

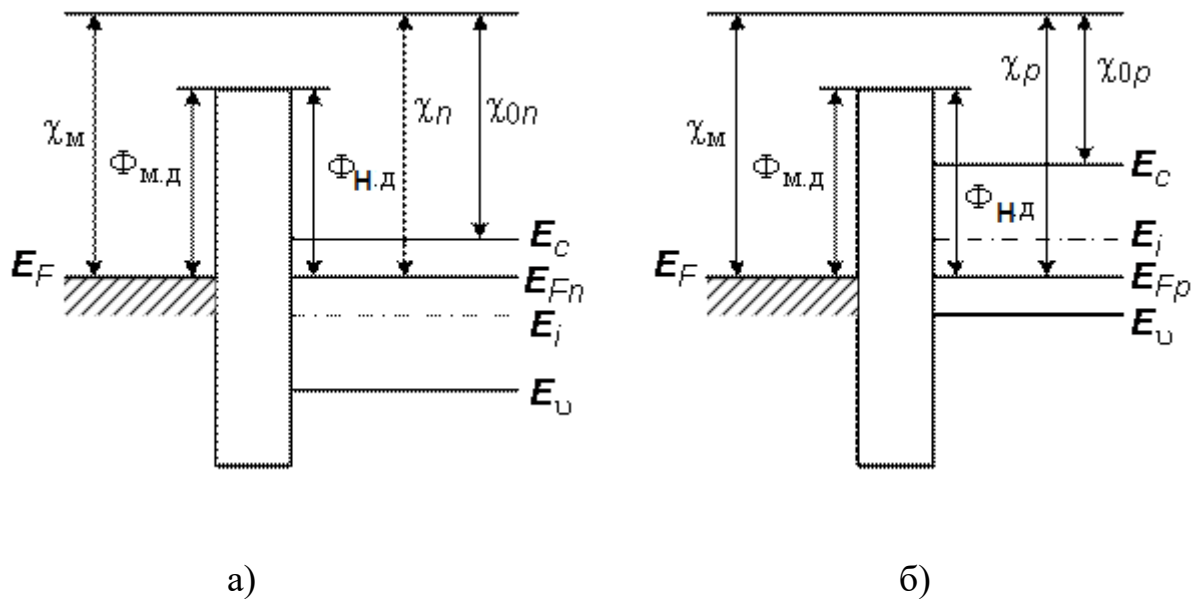


Рис 1.2. Енергетичні діаграми ідеальної МДН-структури з індукованим каналом в рівноважних умовах: а) напівпровідник n-типу, б) напівпровідник p-типу[1]

Якщо на МДН-структуру прикласти позитивну напругу під польовим електродом виникає електричне поле, вектор напруженості якого спрямований від електрода до рівня напівпровідника. Силкові лінії, що виходять з польового електрода, повинні закінчитися на рівні негативних зарядів в напівпровіднику або ж в діелектрику, що є описом явища екранування електричного поля. В випадку ідеального діелектрика електричне поле не може екрануватися, тому що в ньому відсутні незв'язані заряди, тому поле проходить скрізь нього до напівпровідникової підкладки, та може зануритись в неї. Хоча в МДН-структурах з напівпровідниковою підкладкою n-типу провідності екранування електричного поля спостерігається лише за рахунок підтягування вільних носіїв заряду з об'єму напівпровідника до його границі розподілу з діелектриком. За рахунок екранування електричного поля в приповерхневій зоні напівпровідника n-типу провідності виникає об'ємний негативний заряд, що розташовуються в шарі кінченої ширини за рахунок дифузійного вирівнювання концентрації електронів. В результаті цих дій створюється шар,

що прийнято називати областю об'ємного або просторового заряду (ООЗ або ОПЗ). Приповерхневий шар, де концентрація основних носіїв переважає над концентрацією в повному об'ємі кристалу напівпровідника, має назву шар збагачення. Якщо в підкладці МДН-структури існує такий шар, тоді прийнято вважати, що така структура знаходиться в режимі акумуляції (збагачення).[7]

Якщо розглядати енергетичні діаграми при  $U \neq 0$ , то треба розуміти, що присутність електричного поля в ОПЗ зменшує величину потенціальної енергії носіїв заряду ( в нашому випадку – електронів), тому краї енергетичних зон на границі розподілу діелектрик-напівпровідник згинаються донизу (рис 1.3, а). У такої границі розподілу формується потенціальна яма.[1]

Якщо на МДН-структуру з підкладкою n-типу надати досить невелику негативну напругу, тоді краї енергетичних зон стануть вигнутими догори (рис 1.3, б), а приповерхнева область напівпровідника буде збіднена на основні носії заряду. В подібних випадках прийнято рахувати таку структуру в режимі збіднення.

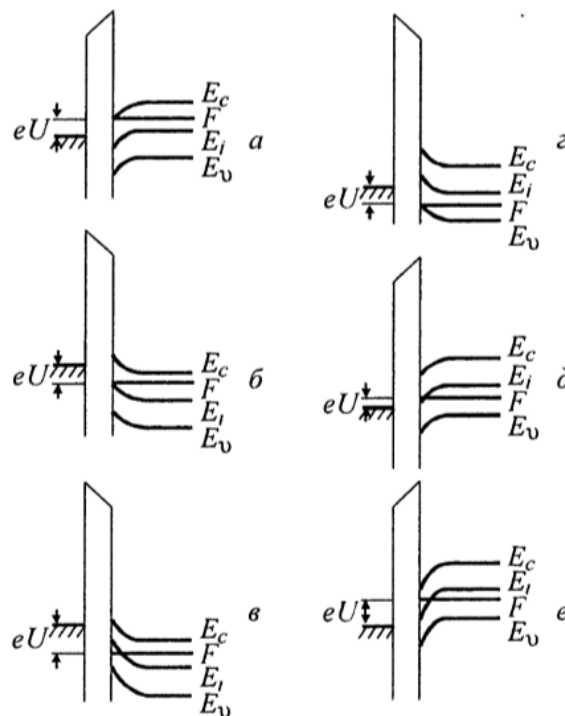


Рис 1.3. Енергетичні діаграми МДН-структур при  $U \neq 0$ : а та г – стан акумуляції, б та д – стан збіднення, в та е – стан інверсії. [7]

Екранування в такому режимі виконується позитивними зарядами малих донорів в ОПЗ, що виникли там через те, що електрони перейшли з поверхні в об'єм кристала.

При великих від'ємних напругах, прикладених до структури, енергетичні зони згинаються вгору на таку величину, що в околі поверхні напівпровідника спостерігається те, що рівень Фермі перетинається середину забороненої зони (рис 1.3, в). Рахується, що така структура знаходиться в режимі інверсії, для якого характерно те, що концентрація неосновних носіїв заряду перевищують концентрацію основних ( $n_d > n_e$ ). Екранування в такому випадку виконується позитивним зарядом дірок та малих донорів.[7]

Аналогічним чином описуються енергетичні діаграми для МДН-структур з підкладкою р-типу. Вказані режими спостерігаються при напругах, протилежних за полярністю (рис 1.3, г, д, е).

## 1.2. Теорія ємності МДН-структури

Для аналізу параметрів МДН-структур широке розповсюдження набув метод вольт-фарадних характеристик (ВФХ), або як його ще називають – C-V метод. Цей метод заснований на властивостях теорії ємності структур метал-діелектрик-напівпровідник. Слід зазначити, що екранування зовнішнього поля може сильно спотворювати такі експериментальні залежності, тому для методу ВФХ використовують зрівняння реальних та ідеальних структур.

За основу теоретичного опису МДН-структур взята теорія області просторового заряду (ОПЗ) напівпровідника. Основні параметри цієї області можна отримати за вирішенням рівняння Пуассона. Граничні умови такого рівняння описуються як [2]:

$$\frac{d^2\varphi}{d^2x} = -\frac{q}{e_s} \left( n_0 \left( 1 - \exp\left(\frac{q\varphi}{kT}\right) \right) - p_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{q\varphi}{kT}\right) \right) \right), \quad (1.1)$$

$$\varphi|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad \frac{d\varphi}{dx}|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (1.2)$$

Де  $q$  – заряд електрона,  $e_s$  – абсолютна діелектрична проникність напівпровідника,  $k$  – постійна Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $\varphi$  – електростатичний потенціал напівпровідника (визначає вигин зон).

$$y = \frac{q\varphi}{kT}; \quad N = \frac{p_o}{n_i} = \frac{n_i}{n_0}; \quad L_D = \sqrt{\frac{e_s kT}{2q^2 n_i}} \quad (1.3)$$

Рівняння (1) та граничні умови (2) можна записати в іншому вигляді:

$$\frac{d^2\varphi}{d^2x} = -\frac{1}{2L_d^2} (N^{-1}(\exp(y) - 1) - N(\exp(-y) - 1)), \quad (1.4)$$

$$\varphi|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad \frac{dy}{dx}|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (1.5)$$

Ємність ОПЗ напівпровідника знаходиться як похідна  $Q_{sc}$  по поверхневому потенціалу  $\psi_s$ :

$$C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s}, \quad (1.6)$$

де  $Q_{sc}$  – об'ємний заряд напівпровідника:

$$Q_{sc} = -\varepsilon_0 \varepsilon_s E_{sc} \quad (1.7)$$



$$E_{sc} = \pm \frac{\sqrt{2}\varepsilon_0\varepsilon_s kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) \quad (1.8)$$

З цього випливає, що ємність ОПЗ напівпровідника:

$$C_{sc} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_s(1 - e^{-\beta\psi_s} + \frac{n_{p0}}{p_{p0}}(e^{\beta\psi_s} - 1))}{\sqrt{2}L_DF\left(\beta\psi_s, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)}, \quad (1.9)$$

Повна ємність МДН-структури визначається з послідовно з'єднаних ємностей діелектрика  $C_i$  та ОПЗ напівпровідника  $C_{sc}$  таким чином:

$$C = \frac{C_i C_{sc}}{C_i + C_{sc}}, \quad (1.10)$$

Слід зазначити, що ємність діелектрика не залежить від напруги зсуву, а визначається лише його конструктивними параметрами.

При досягненні значень напруги, прикладеної до досліджуваної МДН-структури, більше нуля утворюється збіднена область в приповерхневому шарі напівпровідника, який в цьому випадку виконує роль додаткового шару діелектрика. Утворення такого шару веде до зменшення загальної ємності структури.

На практиці, в випадку, коли ємність діелектрика набагато більше ємності шару просторового заряду напівпровідника, то можна вважати, що  $C=C_i$ . Але якщо ємність шару напівпровідника набагато більша за ємність шару діелектрика, тобто прийнято вважати, що ємність діелектрика не несе достатнього впливу та  $C=C_{sc}$ .

В свою чергу ємність діелектрика визначається як:

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i S}{d_i}, \quad (1.11)$$

де  $\varepsilon_i$  — діелектрична проникність діелектрика,  $S_i$  — загальна площа структури,  $d_i$  — товщина діелектричного шару.

Не маловажним параметром є ємність поверхневих станів  $C_{ss}$ . Якщо в забороненій зоні напівпровідника переважають енергетичні рівні енергією, приблизною до енергії поверхневих станів, а відповідно й густиною поверхневих станів, тоді знаходження заряду поверхневих станів можливо за наступною формулою:

$$Q_{ss} = \frac{q N_{ss}}{1 + \exp\left(\frac{E_{ss} - F}{kT} - \frac{q\psi_s}{kT}\right)}, \quad (1.12)$$

З цього випливає, що ємність поверхневих станів:

$$C_{ss} = \beta \frac{dQ_{ss}}{dY_s} = \frac{\beta q N_{ss} \exp\left(\frac{E_{ss} - F}{kT} - \frac{q\psi_s}{kT}\right)}{\left(1 + \exp\left(\frac{E_{ss} - F}{kT} - \frac{q\psi_s}{kT}\right)\right)^2}, \quad (1.13)$$

де параметр  $Y_s$  визначається як:

$$Y_s = \frac{q\psi_s}{kT}, \quad (1.14)$$

### 1.3. Порогова напруга та ємність

Одним з найважливіших параметрів для елементів на основі МДН-структур є порогова напруга (або напруга включення), яка вказує за яким значенням система переходить в режим сильної інверсії ( $\varphi_s = 2\varphi_0$ ).

Прикладена до затвору МДН-структури напруга  $V_g$  ділиться між напівпровідником та діелектриком наступним чином:

$$V_g = V_i + \varphi_s = \frac{Q_g}{C_i} + \psi_s, \quad (1.15)$$

$V_i$  – падіння напруги в шарі діелектрика,  $Q_g$  – заряд на поверхні металічного електрода.

За рахунок умов електронейтральності ( $Q_g + Q_{sc} = 0$ ) вираз (1.14) можна переписати як:

$$V_g = \frac{Q_{sc}}{C_i} + \psi_s, \quad (1.16)$$

Співвідношення (1.9) та (1.15) представляють собою параметричне рівняння ВФХ (C-V) характеристики для ідеальної МДН-структури.

Коли прикладена до поверхні МДН-структури напруга набуває позитивних значення, в цей момент у приповерхневій області напівпровідника формується шар, що виконує функцію другого діелектрика, так як такий шар, сформований рухомими носіями заряду, утворює збіднену область, тобто викликається вигин зон вниз. Через деякий час диференційна ємність зростає до величини  $C_i$ . [1]

У випадку, коли напруга, що прикладена до поверхні МДН-структури, знаходиться в околі негативних значень, залежність ємності ідеальної МДН-структури вважають в стані акумуляції дірок на границі розподілу. В такому випадку диференційна ємність напівпровідника в декілька разів менше за ємність діелектрика, що викликає вигин зон вгору. Тобто значення повної ємності МДН-структури знаходиться в околі значення величини  $C_i$ . [2]

Заряд на металевому електроді за умов електронейтральності:

$$-Q_M = Q_{SC} + Q_{SS} + Q_i, \quad (1.17)$$

Знаючи, що  $C_D = \frac{Q_M}{V_D}$ , запишемо

$$V_i = \frac{Q_M}{C_i} = \frac{Q_{SC} - Q_{SS} - Q_i}{C_i}, \quad (1.18)$$

Необхідно врахувати різницю робот між напівпровідником та металом, звідси:

$$V_g = \Delta\varphi_{ms} + \psi_s - \frac{Q_{SC} - Q_{SS} - Q_i}{C_i}, \quad (1.19)$$

Враховуючи, що заряд поверхневих станів  $Q_{ss}$  має такий вигляд:

$$Q_{SS} = -qN_{ss}(\psi_s - \varphi_0), \quad (1.20)$$

Підставивши всі відомі отримаємо:

$$V_g = \Delta\varphi_{ms} - \frac{Q_i}{C_i} + \frac{qN_{ss}}{C_i}\varphi_0 + \psi_s - \frac{Q_{sc}}{C_i} + \frac{qN_{ss}}{C_i}\psi_s, \quad (1.21)$$

При розгляді напруги плоских зон, треба пам'ятати, що це напруга на затворі структури за значенням поверхневого потенціалу напівпровідника рівного нуль:

$$V_{FB} = V_g(\psi_s = 0). \quad (1.22)$$

В ідеальних МДН-структурах прийнято вважати цей параметр за нуль, а в реальних структурах цей параметр залежить від контактної різниці потенціалів( $\Delta\varphi_{ms}$ ) та ефективного поверхневого заряду ( $Q_{sef}$ ).

$$V_{FB} = \Delta\varphi_{ms} - \frac{Q_i}{C_i} + \frac{qN_{ss}}{C_i}\varphi_f, \quad (1.23)$$

Порогова напруга вказує на те, що при досягненні цього значення система переходить в стан сильної інверсії:

$$V_T = V_{FB} + 2\varphi_f + \frac{qN_{ss}}{C_i}2\varphi_f - \frac{Q_i}{C_i}, \quad (1.24)$$

Відповідно до порогової напруги, значення порогової ємності ідеальної МДН-структури знаходиться таким чином:

$$C_T = \frac{e_i}{d_i + \left(\frac{e_i}{e_s}\right)W_m}, \quad (1.25)$$

де  $W_m$  – ширина збідненої області.

Значення порогової ємності відповідає значенню мінімальної високочастотної ємності ідеальних МДН-структур.

#### 1.4. High-k діелектрики

Кремній з-за своїх якісних властивостей напівпровідника зайняв дуже велику нішу майже у всіх галузях, пов'язаних з електронікою. При виготовленні МОН напівпровідникових приладів, зокрема транзисторів, найбільш розповсюдженим матеріалом використовується діоксид кремнію, який має ряд переваг над іншими сполуками:

- Має гарну адгезію з кремнієвою підкладкою;
- Низька концентрація дефектів;
- Якісні ізолюючі властивості;
- Є можливість контролювати товщину та однорідність шару через те, що нарощується такий шар методом високотемпературного окислення;
- Високі показники термічної та хімічної стійкості.

У наш час прилади намагаються зробити якомога менше, компактніше і продуктивніше. І саме зі зменшенням розміру структур, в яких присутній діоксид кремнію, зазнають певних труднощів. Розглянемо формулу знаходження струму насичення транзистора та ємності затвору:

$$I_d = \frac{W}{L} \mu C_{inv} \frac{(V_g - V_T)^2}{2}, \quad (1.26)$$

де  $I_d$  – струм каналу,  $W$  -ширина каналу,  $L$  -довжина каналу,  $\mu$  – рухливість носіїв,  $C_{inv}$  – ємність затвору в інвертованому стані,  $V_g$  – напруга

на затворі,  $V_T$  – напруга інверсійного шару (напруга «відкриття» транзистора).

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s S}{d}, \quad (1.27)$$

Як можна бачити з формул, площа транзистора пропорційна ємності затвору, що звісно викликає обмеження кількості струму, що протікає скрізь нього. Одним з якісних способів збільшення кількості такого струму, тобто збільшенню ємності затвору, є зменшення товщини підзатворного діелектрика. Однак цей спосіб обмежується струмом витоку, що виникає при досягненні товщини меншою за 3 нм. Виникнення струму витоку обумовлено тунелюванням зарядів, що проходять через діелектрик. За подальшого зменшення товщини діелектричного шару струм витоку експоненціально зростає.

Також слід звернути увагу на іншу проблему. При зменшенні товщини підзатворного діелектрика зменшується й надійність приладу. Рух носіїв заряду в структурі приводить до виникненню дефектів не тільки в діелектрику, а й на його границі з підкладкою. А в достатньо тонких шарах критичний рівень дефектів зменшується, що сприяє збільшенню шансу виходу приладу з ладу.

Ці проблеми вирішує виготовлення підзатворного діелектрика з матеріалу з високою діелектричною проникністю, що дозволяє збільшити його товщину, одночасно збільшуючи ємність затвора, забезпечуючи зниження струму витоку на кілька порядків в порівнянні з більш тонким діелектриком з діоксиду кремнію, що забезпечує рівну ємність затвора.

Розглянемо більш детально відмінності діелектриків з високою діелектричною проникністю від  $\text{SiO}_2$ [6]:

1. Діоксид кремнію є майже ідеальним діелектриком, практично без об'ємних зарядів і без ємності просторового заряду. В той час як матеріали high-k – це збіднені діелектрики з величезними зарядами ( $10^{13}$  /  $\text{см}^2$ );
2. Хоча система Si-SiO<sub>2</sub> є справжнім і дивовижним даром природи (з щільністю стану структури порядку  $10^{10}$   $\text{см}^2/\text{В}$ ), Si-high-k (і тим більше Ge-high-k, GaAs-high-k, тощо) структури є не менш складними (щільність структури  $10^{13}$   $\text{см}^2/\text{В}$ ).
3. За допомогою затворного електрода з полікремнію, симетрична структура Si-SiO<sub>2</sub>-poly-Si практично не схильна до проблем з термічної та хімічної стабільності, що можуть спостерігатися у напівпровідника/high-k стеків/металевих електродів структури.
4. SiO<sub>2</sub> зобов'язаний своїми неперевершеними фізичними, хімічними і, що найбільш важливо, електронними властивостями здебільше своєму ковалентному характеру, в той час у матеріалів з high-k недоліки обумовлені головним чином іонним характером.
5. З-за іонного характеру high-k діелектрики погано узгоджуються з усіма напівпровідниками (включаючи Si), які майже повністю ковалентні.
6. SiO<sub>2</sub> є важким для кристалізації і є дуже стійким матеріалом в термічному відношенні. Протилежне стосується матеріалів high-k, які легко кристалізуються значно нижче температури активації імплантанту.
7. Діоксид кремнію має найвищий ширину забороненої зони(близько 9 еВ) серед неорганічних твердих матеріалів, тоді як матеріали з високим рівнем k мають лише помірну до високих(близько 4-6 еВ) смугу заборонної зони.
8. SiO<sub>2</sub> має найвищий електричний опір (порядку  $10^{23}$  Ом\*см), коли-небудь зафіксований (опір чисто електронний, іонного внеску немає); іонність матеріалів з високою діелектричною проникністю надає їм



питому електропровідність, що набагато перевищує те, що може запропонувати тільки їх електронна або заборонена зона.

Простіше кажучи,  $\text{SiO}_2$  – прекрасний діелектрик з чудовими параметрами, за винятком його низької діелектричної проникності, в той час як high-k діелектрики виділяються лише своєю високою діелектричною проникністю. Поки що важко уявити, що high-k діелектрики зможуть витіснити  $\text{SiO}_2$ . Але слід врахувати, що наявність високої діелектричної проникності в таких матеріалах пом'якшують деякі з їх проблем[6]:

- Одна з проблем зв'язана з величезним зменшенням електричного поля в різних шарах high-k діелектриків через високу діелектричну проникність. Слід зазначити, що набагато слабе електричне поле буде викликати той же заряд інверсійного шару.
- Це, в свою чергу, відповідає за помірні потенціали затворів з high-k, хоча об'ємна щільність заряду і щільність зарядів на границі розподілу можуть бути дуже великими. Отже, стало можливим підтримувати тенденцію зниження порога і напруги живлення.
- Низьке електричне поле також може підвищити надійність затворів, навіть при наявності всередині великих зарядів.

Матеріали з високим показником діелектричної проникності мають дуже гарні перспективи. Наприклад, в статті «High-k Gate Dielectrics for Emerging Flexible and Stretchable Electronics»[11] розповідається про можливість і перспективу використання high-k діелектриків у сучасній гнучкій електроніці (смартфони, «розумні» годинники, LED панелі, сонячні батареї та інше).

Одна з особливих властивостей high-k діелектриків полягає в можливості усування витоку тунельного струму. Ця властивість вже набула не малого розповсюдження в виготовленні ІС, методи визначення параметрів таких структур наведені у «Electrical Characterization of High-K Dielectric Gates for Microelectronic Devices»[12].

### Висновок до розділу

Ідеальною МДН-структурою вважається структура, де немає переносу носіїв заряду через діелектрик, тобто його опір безкінечно великий по відношенню до постійного струму; енергетичні зони напівпровідника не мають початкових вгинів, тобто дефектів; поверхневі стани на межі розподілу діелектрик-напівпровідник відсутні. Таке поняття загалом використовують для теоретичного опису моделі МДН-структури. Структури метал-діелектрик-напівпровідник мають три режими роботи: збагачення, режим слабкої та сильної інверсії.

Значення порогової напруги системи показує коли досліджувана структура переходить в режим сильної інверсії. Напруга плоских зон – параметр, що відповідає напрузі на затворі МДН-структури за відсутнім поверхневим потенціалом ( $\psi_s = 0$ ).

Діелектрики з високим показником діелектричної проникності мають ряд переваг над іншими відомими діелектриками. Наразі вивчається можливість використання таких матеріалів у багатьох мікроелектронних приладах на пристроях.

## 2.МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МДН-СТРУКТУР ЗА ВФХ

### 2.1. Визначення параметрів МДН-структури за ВФХ класичним методом

Для визначення параметрів напівпровідникових структур застосовують багато різних методів, в яких є унікальні риси під час їх використання. Розглянемо метод вольт-фарадних характеристик (ВФХ). Даний метод використовується для визначення параметрів структури на основі напівпровідника, що має деяку ємність. Це і є відмінною рисою цього метода від інших. Реалізація такого методу виконується поданням на структуру двох електричних сигналів: постійний (напруга зсуву) та змінний невеликої амплітуди (вимірювальний сигнал). Перший сигнал забезпечує підтримання структури в області робочої точки, другий власно й використовують для знаходження ємності структури. Основою цього метода є наявність просторового заряду в приповерхневій зоні МДН-структури, в якій також існує диференціальна поверхнева ємність.

За допомогою такого методу можна визначити: товщину діелектрика, тип та рівень легування напівпровідника в такій структурі, напругу «плоских зон» та порогової напруги, ефективний поверхневий заряд та ін[2].

Для визначення товщини діелектрика нам потрібні значення ємності в області збагачення структури, тобто ємність діелектрика( $C_i$ ), загальна площа( $S$ ) та діелектрична проникність діелектрика( $\epsilon_i$ ). Відомо, що ємність МДН-структури визначається за параметром, що називається геометрична ємність структури, тому[3]:

$$d_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i S}{C_i}, \quad (4.1)$$

На рис 2.1. можна спостерігати ВФХ структури за різних значень  $d_i$ :

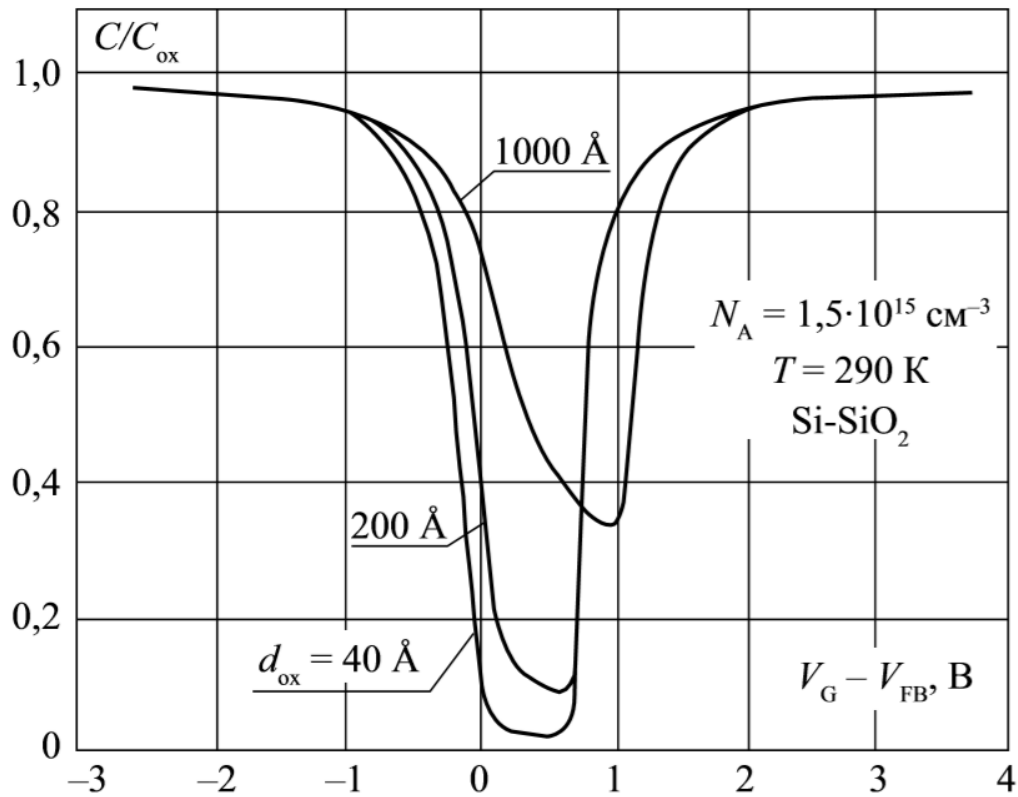


Рис 2.1. ВФХ ідеальних МДН-структур за різної товщини діелектрика [3]

На практиці, для більшості структур метал-діелектрик-напівпровідник повна ємність відрізняється від ємності діелектрика лише не кілька відсотків.

За відомим значенням товщини діелектрика стає можливо розрахувати концентрацію домішок в напівпровіднику, так як в такій структурі вона залежить лише від ступеня легування напівпровідника, тобто від залежності максимальної ємності в області збагачення та мінімальної диференційної ємності:

$$\frac{N_D}{n_i} = \frac{4e_i^2 kT \ln\left(\frac{N_B}{n_i}\right)}{\left[\frac{C_i}{C_T} - 1\right]^2 d_i^2 e_s q^2 n_i}, \quad (4.2)$$

$$\text{Або } N_A = \frac{kTC_g}{\varepsilon_0 \varepsilon_s q^2} \quad (4.3)$$

Таке рівняння можна розрахувати ітераційними методами. Також концентрацію домішок можна визначити за теоретичними кривими:

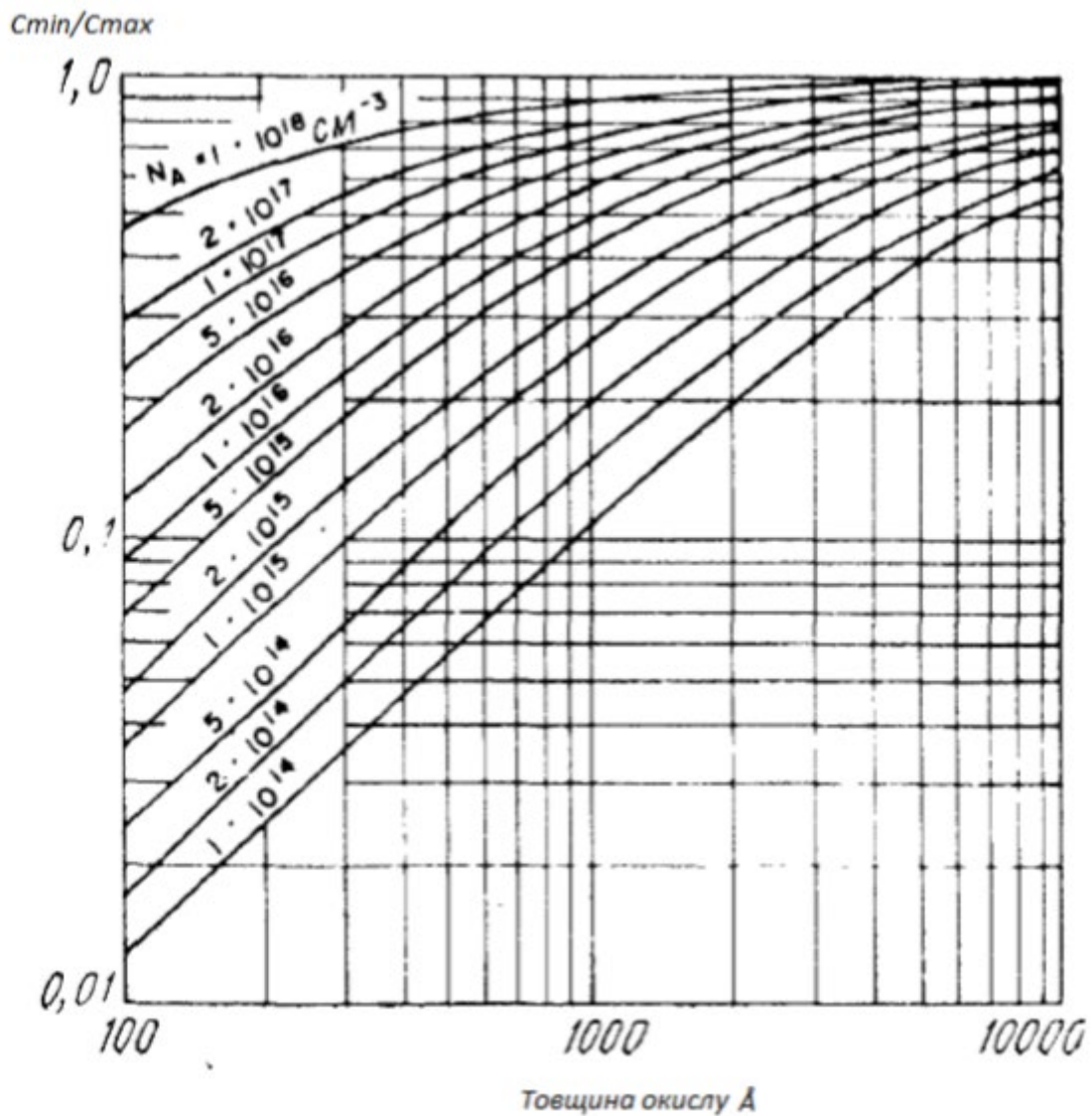


Рис 2.2. Залежність нормованої ємності ( $C_{min}/C_{max}$ ) від товщини діелектричного шару за різних значень концентрації домішок [2]

Напруга, відповідає нульовому значенню поверхневого потенціалу, на затворі рахується напругою плоских зон. Якщо для ідеальних МДН-структур така напруга прийнята за 0, то в реальних (експериментальних) структурах на цей показник впливають різниця потенціалів між металом та напівпровідником, яка впливає на скривлення енергетичних зон. Тому для досягнення необхідного ефекту випрямлення енергетичних зон необхідно до металічного електроду прикласти напругу, що дорівнює:

$$V_{FB} = \varphi_{MS} + \frac{Q_{sef}}{C_i}, \quad (4.4)$$

де  $\varphi_{MS}$  – контактна різниця потенціалів,  $Q_{sef}$  – ефективний поверхневий потенціал.

Експериментальне знаходження цього параметру базується на твердженні, що однаковим значенням поверхневого потенціалу відповідають однакові значення ВЧ ємності реальної та ідеальної МДН-структур. Методика знаходження: 1) Розрахунок ємності плоских зон за формулою:

$$C_{FB} = \frac{e_i}{d_i + (e_i/e_s)L_{def}}, \quad (4.5)$$

де

$$L_{def} = \sqrt{\frac{e_s kT}{q^2(n_0 + p_0)}}, \quad (4.6)$$

- ефективна Дебаєвська довжина екранування.

2) За значеннями експериментальної ВЧ ВФХ знаходиться напруга на затворі, яка відповідає знайдений ємності.

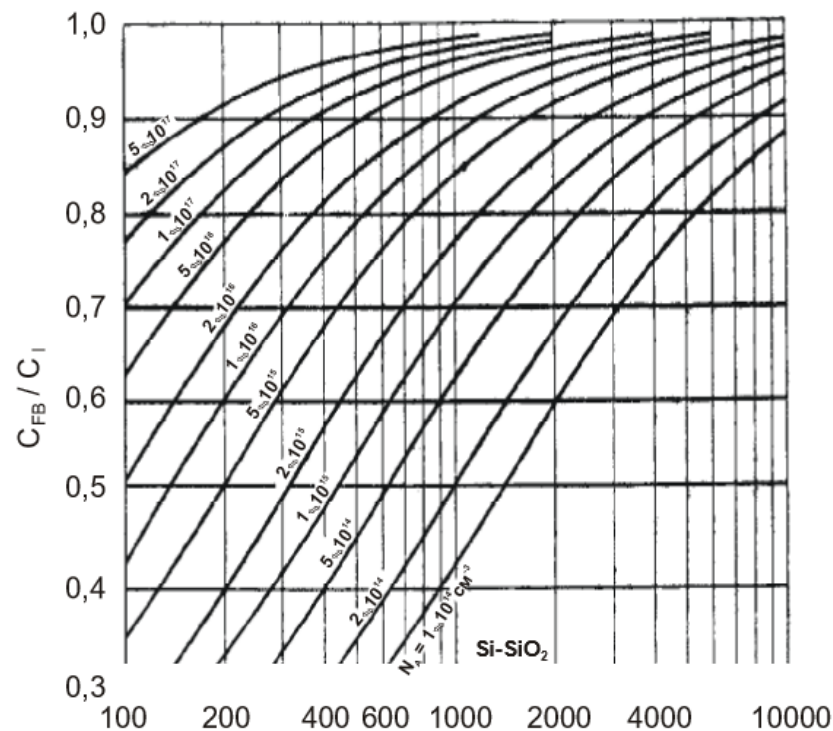


Рис 2.3. Залежність ємності плоских зон від товщини шару окисла на межі Si-SiO<sub>2</sub> [2]

Аналогічним чином (експериментально) знаходиться значення порогової напруги.

Ефективний поверхневий заряд (ЕПЗ) – заряд, що сприяє екрануючий ефект на поверхню напівпровідника сукупністю усіх реальних зарядів, що знаходяться на поверхні діелектрика та на границі розподілу діелектрик-напівпровідник. Такі заряди існують в окислі реальної МДН-структури та залежать від параметрів поверхневого потенціалу.

Значення ЕПЗ можна розрахувати за формулою:

$$Q_{sef} = C_i(\varphi_{MS} - V_{FB}), \quad (4.7)$$

що виходить з формули 2.4.

Поділивши отримане значення на одиничний заряд електрона можна знайти ефективну щільність поверхневих станів  $N_{sef}$ .

## 2.2. Метод Термана

Метод Термана (або диференційний метод) базується на порівнянні експериментальних та теоретичних (розрахованих для ідеальної МДН-структури) високочастотних вольт-фарадних характеристик (рис 2.4).

Оскільки даним методом описується лише високочастотна ємність, то вона залежить лише від поверхневого потенціалу. Таким чином, якщо розглядати теоретичну та експериментальну ВФХ структури на одному графіку, то провівши горизонтальні лінії, ми на експериментальній кривій виставляємо значення поверхневого потенціалу. Опустивши перпендикуляри на вісь напруги визначаємо різницю напруги на затворі теоретичної та експериментальної ВФХ, що відповідають одній і тій же ємності.

З цього отримуємо, що різниця напруг на затворі визначається:

$$\Delta V_g = V_{g\text{експ}} - V_{g\text{теор}} = V_{FB} + \frac{qN_{ss}}{C_i}, \quad (4.8)$$



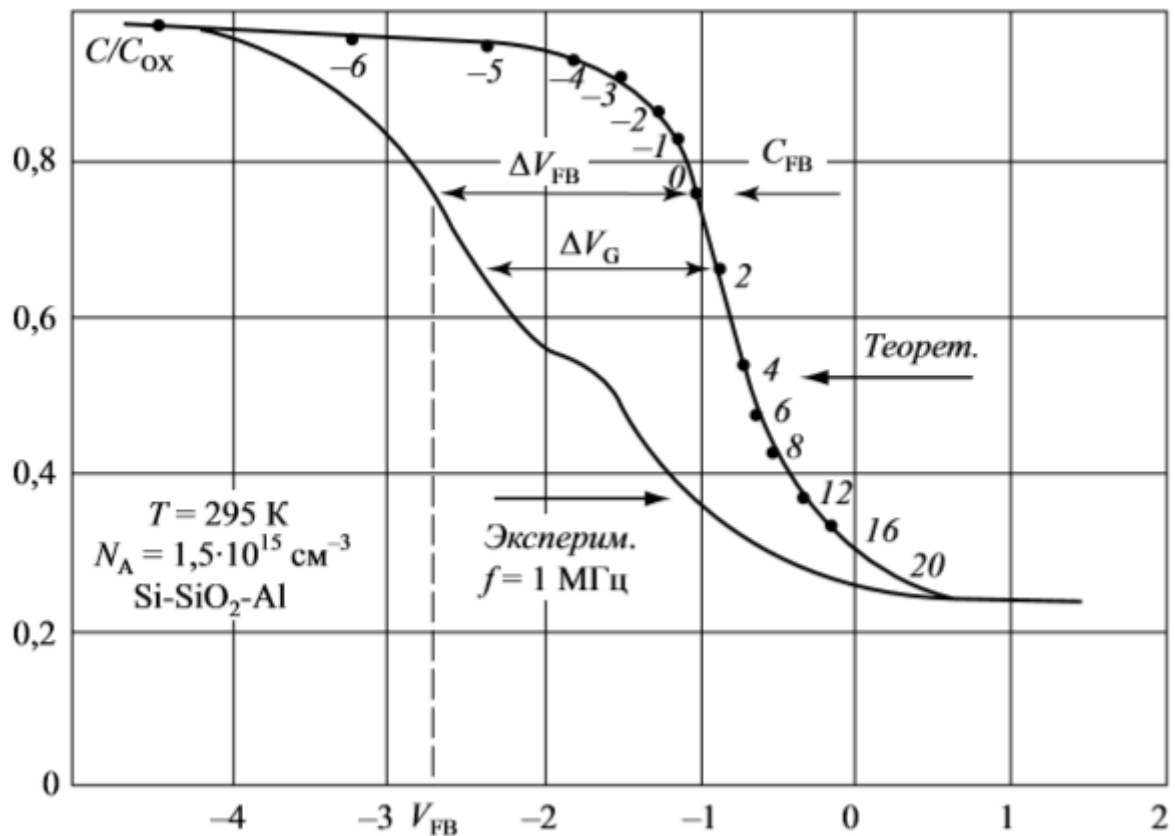


Рис 2.4. Порівняння експериментальної та теоретичної ВФХ

Розподіл густини поверхневих станів на межі діелектрик-напівпровідник отримаємо за графічним диференціюванням:

$$N_{ss} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{q d_i} \frac{d(V_{g\text{експ}} - V_{g\text{теор}})}{d\psi_s}, \quad (4.9)$$

Основною перевагою метода Термана є його простота. Недоліками цього метода можна виділити те, що залежність густини ПС від енергії таких станів можливо спостерігати лише в одній частині забороненої зони.

### **Висновок до розділу**

Вольт-фарадні методи визначення параметрів МДН-структури базуються на залежності ємності структури від прикладеної до неї напруги. Дослідження ємності є якісним методом визначення електрофізичних параметрів структури за рахунок того, що ємність в таких структурах обумовлена наявністю об'ємного заряду в приповерхневій зоні напівпровідника.

За вольт-фарадними характеристиками можна визначити такі параметри МДН-структури: рівень легування напівпровідника, напругу та ємність плоских зон, щільність поверхневих станів на межі діелектрик-напівпровідник.

### 3. АНАЛІЗ ЗАРЯДОВИХ СТАНІВ МДН-СТРУКТУРИ ЗА ВФХ

#### 3.1. Вплив заряду на ВФХ МДН-структури

Цікавою особливістю напівпровідникового матеріалу є залежність його електричних та оптичних властивостей від стану на поверхні та можливість зміни своїх властивостей під впливом різних видів обробки. Поясненням такого ефекту є те, що в обмеженому кристалі таких матеріалів присутні не тільки квантові стани, а й додаткові стани, де електрони локалізовані саме на поверхні такого кристалу. Відповідно, з-за цього виникають локальні рівні енергії поблизу з границею поверхні напівпровідника.[5]

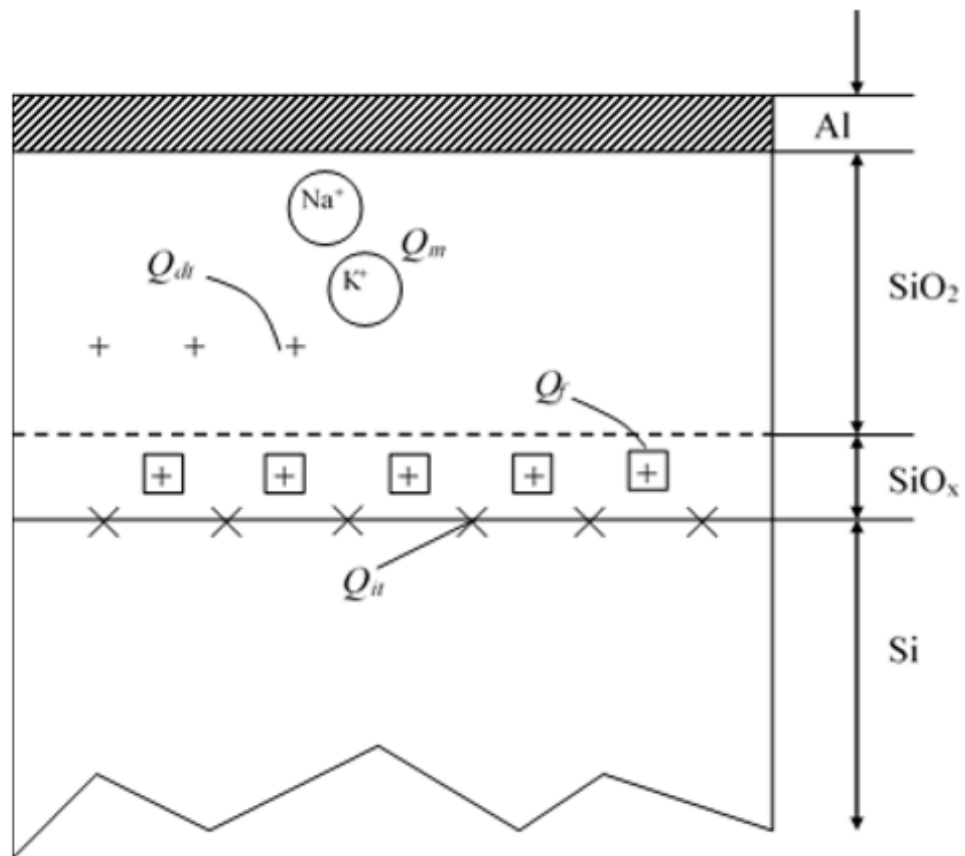


Рис 3.1. Розташування зарядів на поверхні діелектрика та на границі розподілу діелектрик-напівпровідник [4]

Наявність локальних поверхневих рівнів енергії призводить до притягання дірок та електронів до поверхні, що насамперед викликає появу електричного заряду. Під час цього під поверхнею виникає індукований заряд, що має таку ж величину, але протилежний за полярністю знак. Це сприяє виникненню збагачених або збіднених приповерхневих шарів.[5]

В МДН-структурах в області збагачення ємності об'ємного просторового заряду напівпровідника переважає ємність діелектрика, що викликає собою те, що ємність МДН-структури намагається порівнятися з ємністю діелектрика. В той же час, в області збіднення або слабкої інверсії зовсім протилежна ситуація – ємність діелектрика переважає над ємністю ОПЗ, а ємність МДН-структури визначається значенням ємності ОПЗ напівпровідника. На рис 3.2. представлена ВФХ ідеальної МДН-структури:

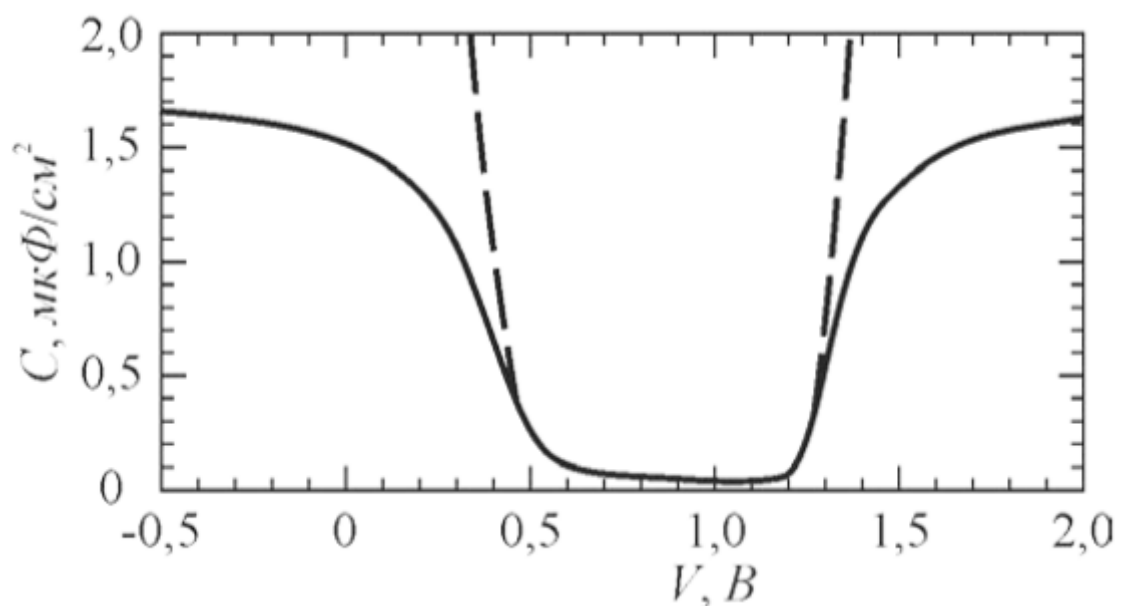


Рис 3.2. ВФХ ідеалізованої МДН-структури ( $D_{it}=0$ ,  $Q_f=0$ ) – сувільна лінія. Залежність ємності ОПЗ від напруги – пунктирна лінія [4]

Вплив деякого фіксованого заряду  $Q_f$  (позитивний заряд в діелектрику) на ВФХ МДН-структури показуєтьс лише на зміщенні характеристики

уздовж осі напруги, та не при яких умовах не видозмінює форму ВФХ (рис 3.3).

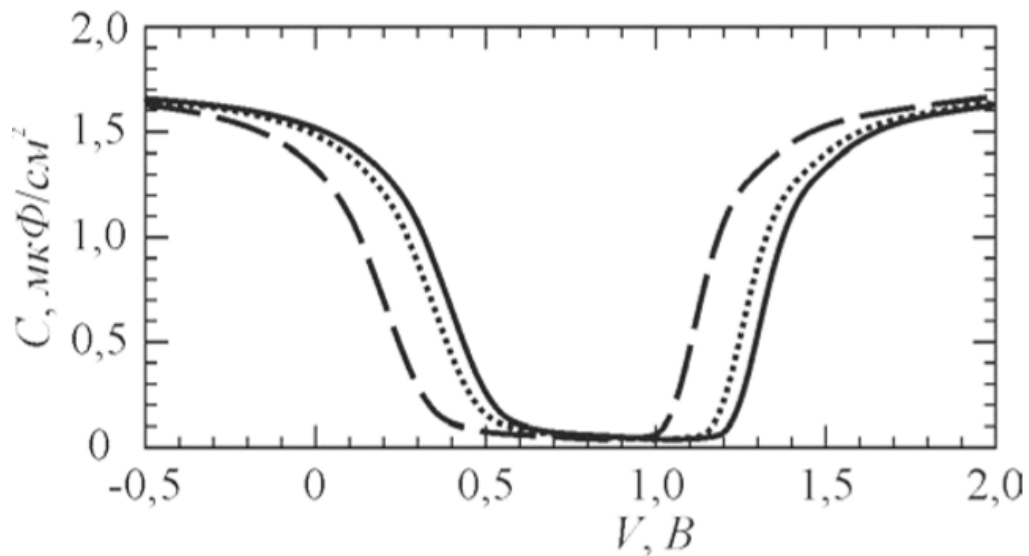


Рис 3.3. ВФХ МДН-структури за відсутності фіксованого заряду  $Q_{it}$  (суцільна лінія), та при наявності заряду  $Q_f = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$  (точкова лінія),  $Q_f = 3.2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$  (пунктирна лінія) [4]

Але з протилежного боку, зміна заряду  $Q_{it}$  (заряд на границі розділу діелектрик-напівпровідник) призводить до видозмінення форми ВФХ: розширення областей збіднення та слабкої інверсії, зростання ємності (рис 3.4).

Так як заряд має найбільший вплив лише в областях збіднення та слабкої інверсії, то для визначення змін ємності можна розглядати тільки ці дві області. Ємність ОПЗ за умови, що розглядаються лише паралельно з'єднанні ємності ОПЗ напівпровідника, буде мати таку залежність від поверхневого потенціалу:

$$C_{sc}^{FB+} = \sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 q N_A}{2(\psi_s - \frac{k_B T}{q})}} \quad (3.1)$$

Напруга на поверхні МДН-структури лінійно залежить від поверхневого потенціалу :

$$V_g - V_{FB} = n\psi_s, \quad (3.2)$$

де  $n = (C_{ox} + C_{it} + C_B^*) / C_{ox}$  – константа, в якій  $C_B^*$  – ємність ОПЗ за умови, що  $\psi_s = \varphi_0$ .

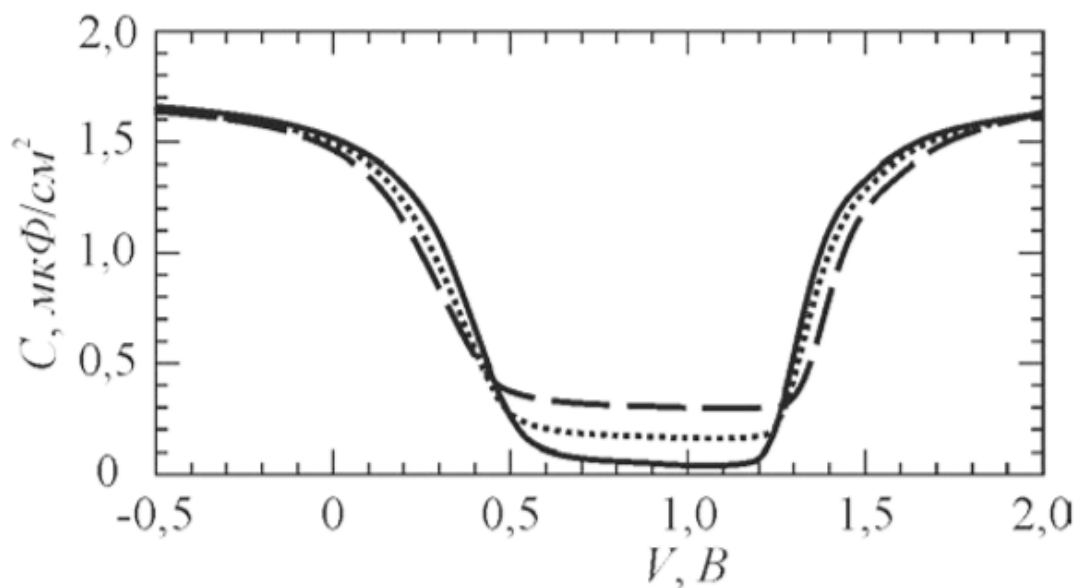


Рис 3.4. ВФХ МДН-структури за  $Q_f = 0$ , у відсутність заряду  $Q_{it}$  (суцільна лінія), та при наявності заряду  $Q_{it}$  :  $D_{it} = 9 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  (точкова лінія),  $D_{it} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  (пунктирна лінія) [4]

Слідуючи з вищесказаного, отримаємо залежність ємності ОПЗ від напруги на МДН-структурі:

$$C_{sc}^{FB+} = \sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 q N_A}{2((V_g - V_{FB})n^{-1} - \frac{k_B T}{q})}} \quad (3.3)$$

Така залежність дає можливість визначити напругу плоских зон на МДН-структурі. Вираз має такий вигляд:

$$V_{FB} = V_g - n \frac{kT}{q}, \quad (3.4)$$

Похибка такого виміру напруги плоских зон не може переважати значення в  $-n \frac{k_B T}{q}$ . Слід зазначити, що за відомих параметрах матеріалів структури та умовах проведення експерименту параметр  $n$  можна розрахувати більш точно.[4]

### 3.2. Модель МДН-структури у вигляді конденсаторної системи

Як вже описувалося раніше, напівпровідники мають властивість змінювати свої параметри під впливом на поверхню напівпровідникового пристрою, приладу різної обробки, навколишньої середовища та іншого. Існування електронних станів поряд з поверхнею або ж в забороненій області напівпровідника підштовхують на ще одну особливість таких поверхневих станів.

Поверхневі стани, що виникають в зоні провідності, в нейтральному стані не мають електрона, а при його захопленні стають негативно зарядженими. Тобто поведінка схожа з поведінкою акцепторних домішкових рівнів в об'ємі напівпровідника, але розташовані у верхній половині зони.

Відповідно цьому, рівні, що походять із заповненої зони, в нейтральну стані мають електрон, що при порушенні може перейти в незаповнену зону, тим самим залишивши позитивний заряд[5].

МДН-структура в реальному представленні – це конденсатор, в якому одна обкладка виконана з кремнію. У випадку, коли до такого конденсатора прикласти відносно металу позитивне зміщення, тоді поверхневий шар напівпровідника n-типу буде збагачуватись електронами. Якщо ж розглядати напівпровідник р-типу, тоді в такому ж випадку в ньому виникає збіднений шар, а при прикладанні більш вагомої напруги – інверсійний шар. За зміщення в іншу сторону за рахунок дірок, що є основними носіями, на поверхні напівпровідника n-типу виникає інверсійний шар, а поверхня напівпровідника р-типу набуває збагаченого шару[2].

Виникнення саме області просторового заряду на поверхні напівпровідника вказує на те, що напівпровідник має деяку ємність, величина якої залежить від просторового заряду та прикладеної до поверхні напруги. Розглянемо еквівалентну схему ідеальної МДН-структури[2]:

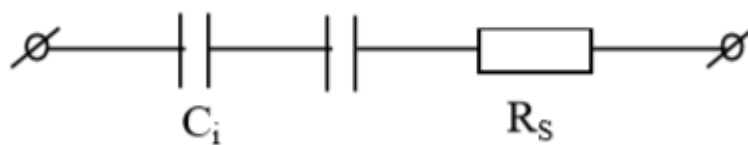


Рис 3.4. Еквівалентна схема ідеальної МДН-структури[2]

За відсутності ПС схема представляє собою електричне коло з двох послідовно підключених ємностей, одна з яких має прямий зв'язок з конденсатором, що утворений за рахунок діелектричної плівки між двома підкладками( $C_i$ ), інша –



діелектрична ємність, що визначається просторовим зарядом, утвореним в напівпровіднику. Насамперед, опір( $R_s$ ) – послідовний опір напівпровідникових пластин, параметри яких залежать лише від матеріалів МДН-структури, товщини кремнію та його питомого опору[2].

При розгляді еквівалентної схеми реальної МДН-структури(рис 3.4), слід зазначити, що в приповерхневій області напівпровідника (на межі напівпровідник-діелектрик) існують заряджені поверхневі стани. Величина цих станів зв'язана з диференційною ємністю(формула 1.6), що підключена паралельно ємності ПЗ.

Основні параметри, що визначають МДН-структуру: густина поверхневих станів  $N_{ss}$ , розподіл густини поверхневих станів в забороненій області напівпровідника, поверхневий потенціал  $\psi_s$ , ефективний поверхневий заряд, величина вбудованого в діелектрик заряду, час життя носіїв, швидкість поверхневих рекомбінацій[2].

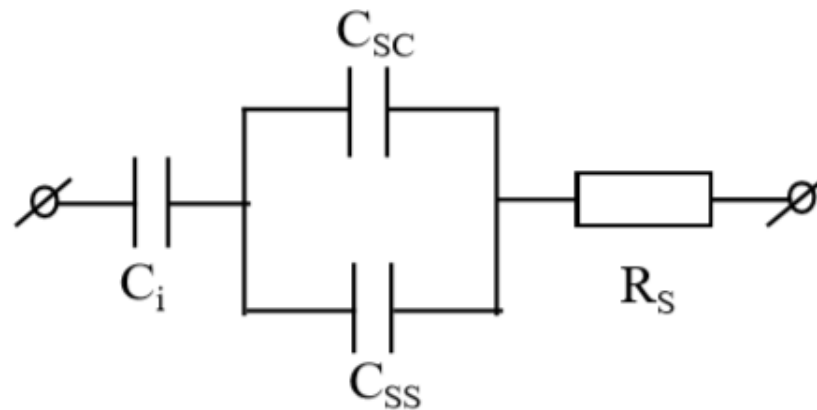


Рис 3.5. Еквівалентна схема ідеальної МДН-структури[2]

Також необхідно придати уваги, що нанесення діелектричної плівки на поверхню напівпровідника зазвичай доволі сильно впливає та змінює структуру ПС та початковий вигин зон на його поверхні. Це відбувається

внаслідок фізико-хімічних процесів, які протікають при утворенні контакту діелектрик-напівпровідник. Дуже важливу роль грає технологія нанесення діелектрика. При деяких способах нанесення діелектричної плівки, наприклад, анодування напівпровідника, в плівці діелектрика порушується нейтральність обсягу окремих його частин, що в свою чергу викликає появу вбудованого заряду, який також впливає на початковий вигин зон. Такий заряд також може виникати внаслідок інжекційних і екстракційних явищ на границі розподілу діелектрика з напівпровідником і металом[10].

До того ж початковий вигин зон в напівпровіднику можливо змінити при нанесенні металевої плівки на систему. Внаслідок дії поля контактної різниці потенціалів між металом і напівпровідником виникає зсув  $C-V$  кривих.

### **3.3. Аналіз поверхневих станів МДН-структури**

При розгляді поверхневих станів МДН-структури необхідно зауважити, що заряд таких станів напряму залежить від зміни поверхневого потенціалу напівпровідника, використаного в системі, який має в собі різноманітні типи поверхневих станів, що розподілені по забороненій зоні. Розрізняють швидкі та повільні ПС. Швидкі обумовлюють свою назву тим, що пастки вільних носіїв знаходяться в безпосередньо прямому зв'язку з напівпровідником, що дозволяє їм реагувати на зміну поверхневого потенціалу дуже швидко. В свою чергу повільні ПС, в основному, знаходяться на деякій відстані(більше 10 нм), що трохи «притупляє» швидкість їх реакції[8].

Як зазначалося в попередньому підрозділі, ПС схожі за поведінкою з акцепторними та донорними домішковими рівнями. За акцепторний ПС вважають стан, що при захопленні електрона стає негативно зарядженим або ж нейтральним, за донорний, коли вони набувають нейтральності віддаючи електрон.

Зміни положення енергетичних рівнів поверхневої пасток, а відповідно й зміни зарядового стану, можна досягти зміною напруги, що прикладають до досліджуваної структури. Це в свою чергу зміщує краї зони провідності напівпровідника на границі розподілу, при чому що рівень Фермі залишається сталим. За досягненням досить великого заряду в поверхневих станах відбувається нахил та зсув ВФХ вздовж осі напруги[8].

Один з вагомих впливів на величину щільності поверхневих станів досягається технологічним методом, за яким відбувався процес окислення напівпровідника. Насамперед, орієнтація окислених пластин грає мало не найважливішу роль. Наприклад, за однакових умов та методів окислення при орієнтації напівпровідника  $[111]$  величина щільності поверхневих станів набуває майже максимального значення, в той час як при кристалографічній орієнтації  $[100]$  – майже мінімальних значень. Для досягнення необхідного зменшення або підвищення значення щільності ПС зразки піддаються додатковій обробці[8].

## 4. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ КРЕМНІЙ-ДІОКСИД КРЕМНІЯ-АЛЮМІНІЙ

### 4.1. Розрахунок основних параметрів

В процесі експерименту була досліджена структура Si-SiO<sub>2</sub>-Al площею 0,01 см<sup>2</sup>. Дослідження проводилось за стандартних умов при кімнатній температурі.

Розрахуємо основні параметри дослідженої МДН-структури класичним методом:

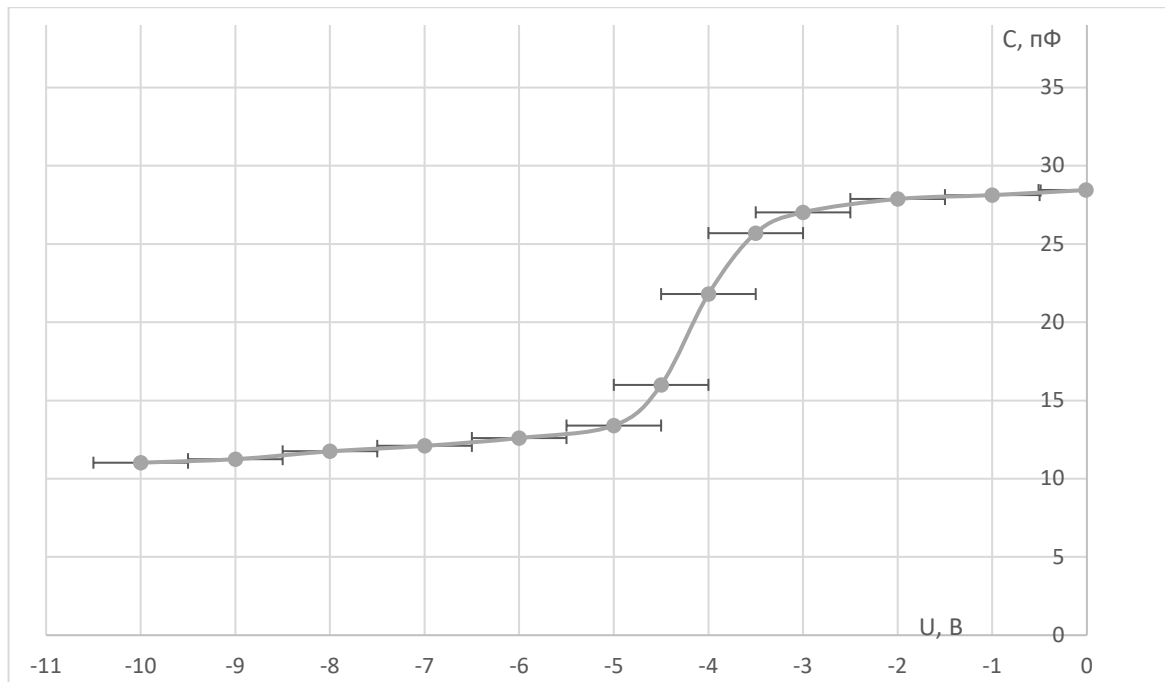


Рис. 4.1. Експериментальна ВФХ МДН-структури

Для подальших розрахунків визначимо максимальну та мінімальну ємність МДН-структури. Для цього можна скористуватися як даними експерименту, так й просто провести горизонтальні лінії на мінімумі та максимумі характеристики відповідно. Отримані параметри ємності:

$$\begin{aligned}C_{min} &= 11.025 \text{ пФ}, \\C_{max} &= 28.6 \text{ пФ}.\end{aligned}\tag{4.1}$$

З теоретичних даних, що були описані вище, можемо зазначити, що параметр максимальної ємності МДН-структури приблизно дорівнює ємності діелектрика, так як ємність напівпровідника в області збагачення не має достатнього впливу на загальну ємність. З цього:

$$C_{max} \simeq C_i.\tag{4.2}$$

Використавши формулу (1.10) знайдемо товщину діелектричного шару:

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i S}{d}\tag{4.3}$$

З цієї формули виведемо значення товщини діелектрика. Отримаємо:

$$d = \frac{8.85 * 10^{-14} * 3.95 * 0.01}{28.6 * 10^{-12}} = 1.22 * 10^{-4} \text{ см}\tag{4.4}$$

За розрахованих даних знайдемо концентрацію домішок:

$$N_D = 5 * 10^{12} \text{ см}^{-3}.\tag{4.5}$$

Використовуючи значення концентрації домішки (2.12) та товщини діелектричного шару (2.11) знайдемо за допомогою теоретичних кривих (рис 2.3) ємність плоских зон:

$$C_{FB} = 22,8 \text{ пФ.} \quad (4.6)$$

Проведемо таку ємність на експериментальній ВФХ та отримаємо напругу плоских зон:

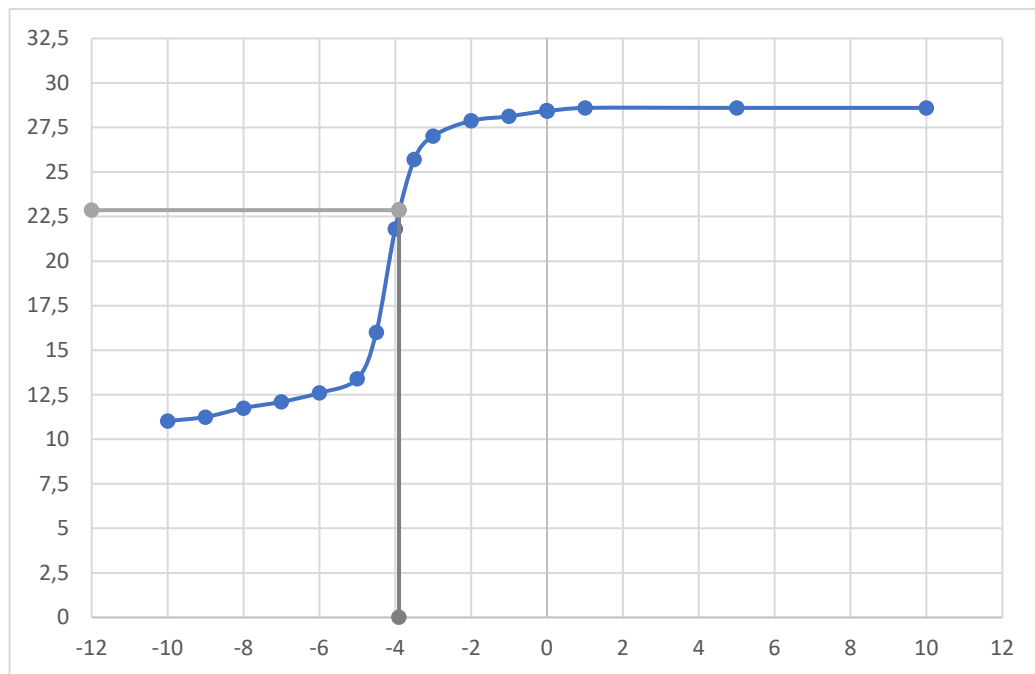


Рис 4.2. Знаходження напруги плоских зон

Напруга плоских зон такої структури:

$$V_{FB} = -3,8 \text{ В.} \quad (4.7)$$

Надалі розрахуємо ці параметри іншими методами та порівняємо. Це дасть нам змогу проаналізувати кожен з методів, виділити переваги та недоліки кожного з них.

#### 4.2. Аналіз ВФХ структури за методом Термана

Виміри вольт-фарадних характеристик структури Si-SiO<sub>2</sub>-Al отриманої залежності наведені нижче:

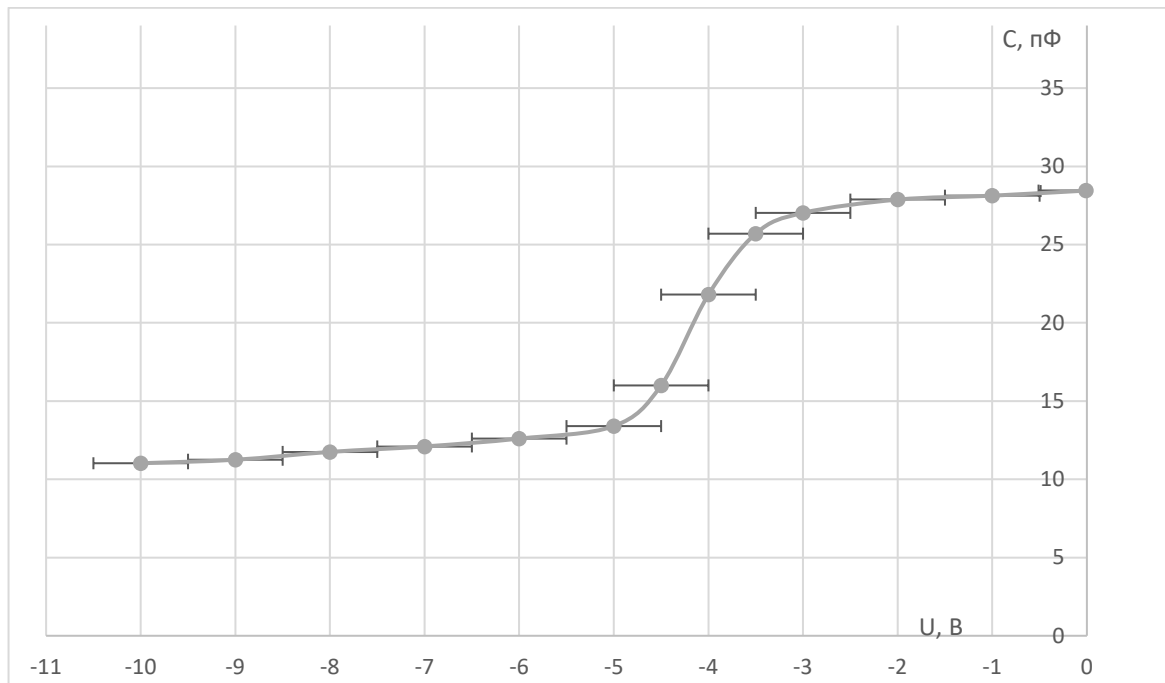


Рис 4.3. Експериментальна ВФХ досліджуваної МДН-структури

Проаналізуємо знайдену вольт-фарадну характеристику, знайдемо розподіл густини заряду в межі діелектрик-напівпровідник.

Так, як і в теоретичному розрахунку, знайдемо максимальну і мінімальну ємності заданої структури за допомогою ВФХ. Як зазначалося раніше, максимальна ємність буде відповідати ємності діелектрика через

недостатній вплив ємності напівпровідника, яким можна знехтувати в області збагачення. Отримані значення:

$$\begin{aligned} C_{min} &= 11.025 \text{ пФ}, \\ C_{max} &= 28.6 \text{ пФ}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Використаємо формулу знаходження ємності діелектрика для знаходження товщини діелектричного шару:

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i S}{d} \quad (4.9)$$

Підставимо значення у формулу. Маємо:

$$d = \frac{8.85 * 10^{-14} * 3.95 * 0.01}{28.6 * 10^{-12}} = 1.22 * 10^{-4} \text{ см} \quad (4.10)$$

За визначених параметрів ВФХ досліджуваної структури знайдемо концентрацію домішок (в нашому випадку донорів) в напівпровіднику за формулою:

$$\begin{aligned} N_D &= \frac{kTC_{sc}^2}{q^2 \varepsilon_0 \varepsilon_s} \\ N_D &= 5 * 10^{12} \text{ см}^{-3} \end{aligned} \quad (4.11)$$

За отриманими раніше даними побудуємо теоретичні ВФХ для цього зразка. Теоретична залежність має такий вигляд:



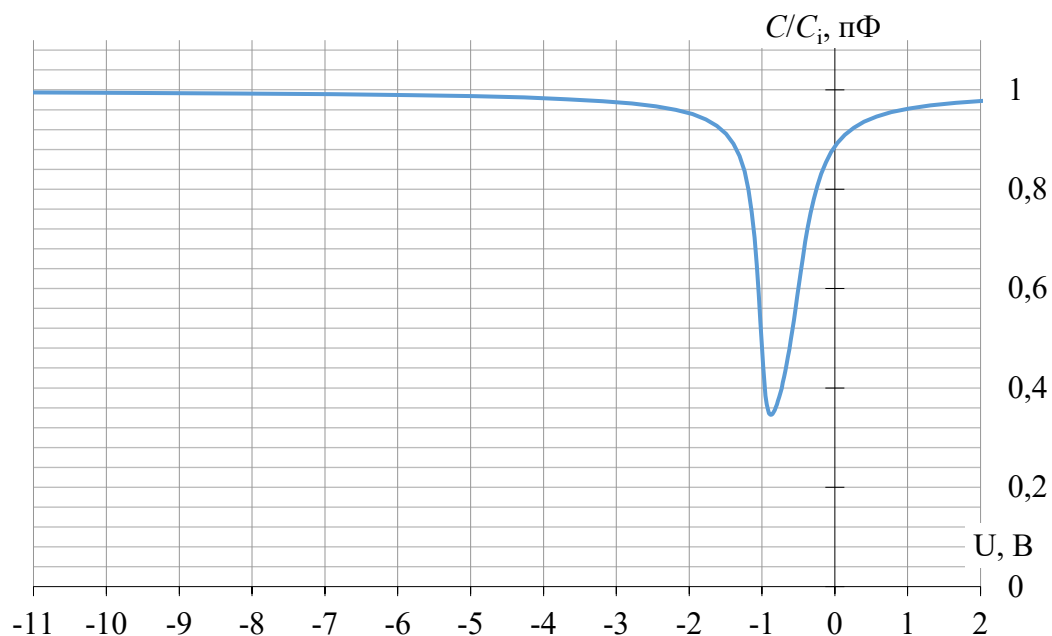


Рис 4.4. Теоретична ВФХ досліджуваної МДН-структури

Для подальших розрахунків різниці напруги затвору для теоретичної і експериментальних характеристик розмістимо їх на одному графіку та відокремимо низькочастотну частину для зручності.

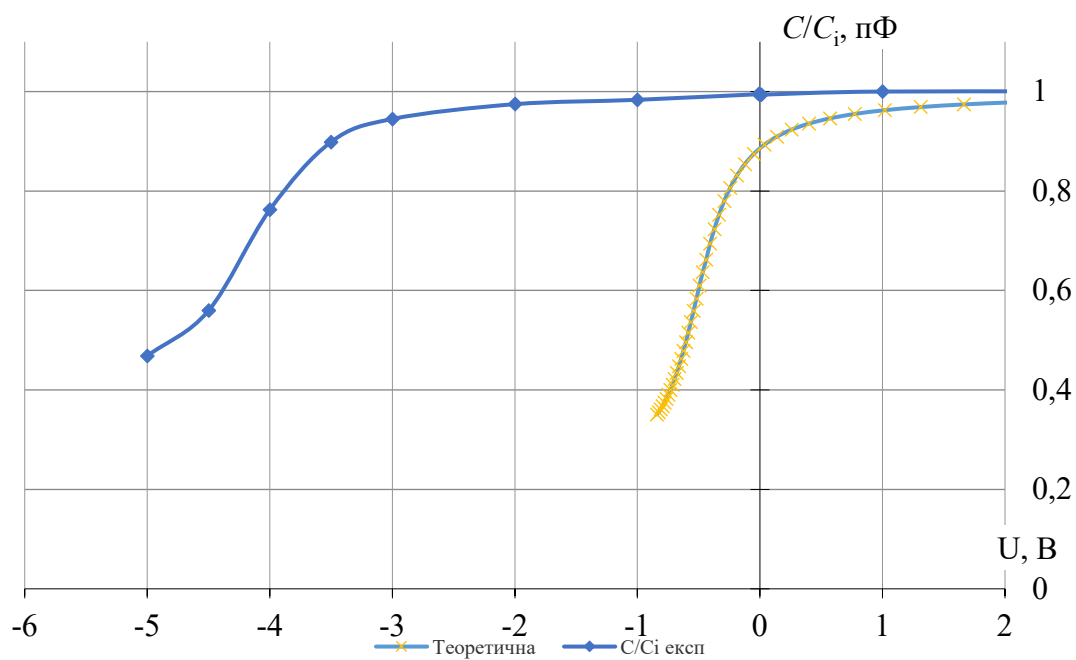


Рис 4.5. Теоретична і експериментальна ВФХ

По теоретичній кривій знайдемо ємність плоских зон:

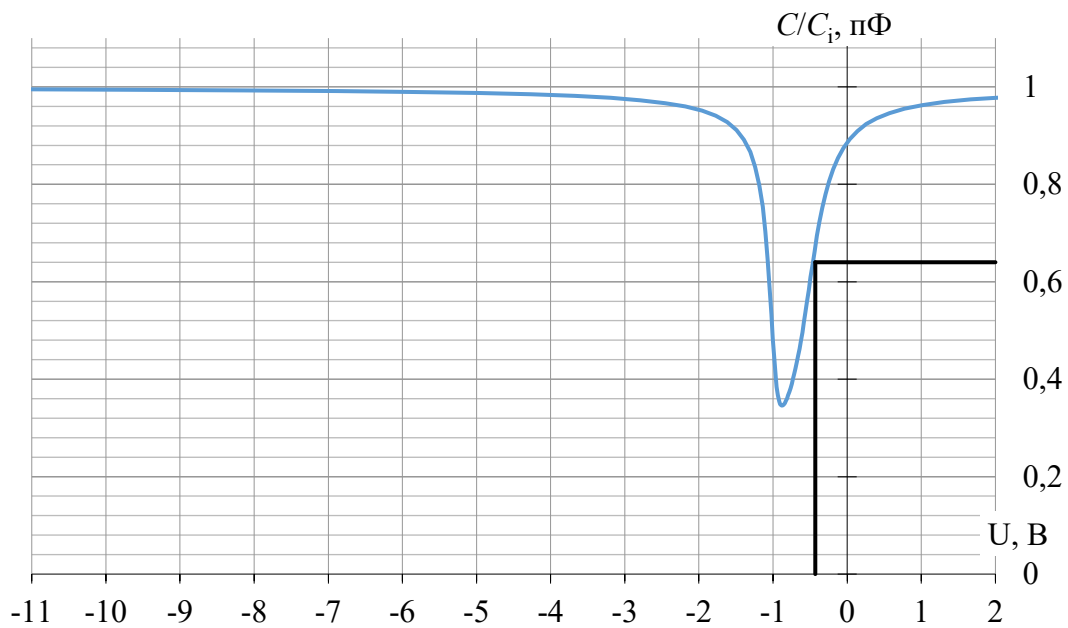


Рис 4.6. Знаходження теоретичної ємності плоских зон за теоретичною ВФХ

$$C_{FB\text{теор}} = 18.35 \text{ пФ} \quad (4.12)$$

Проведемо таку ємність на експериментальну криву та знайдемо напругу плоских зон:

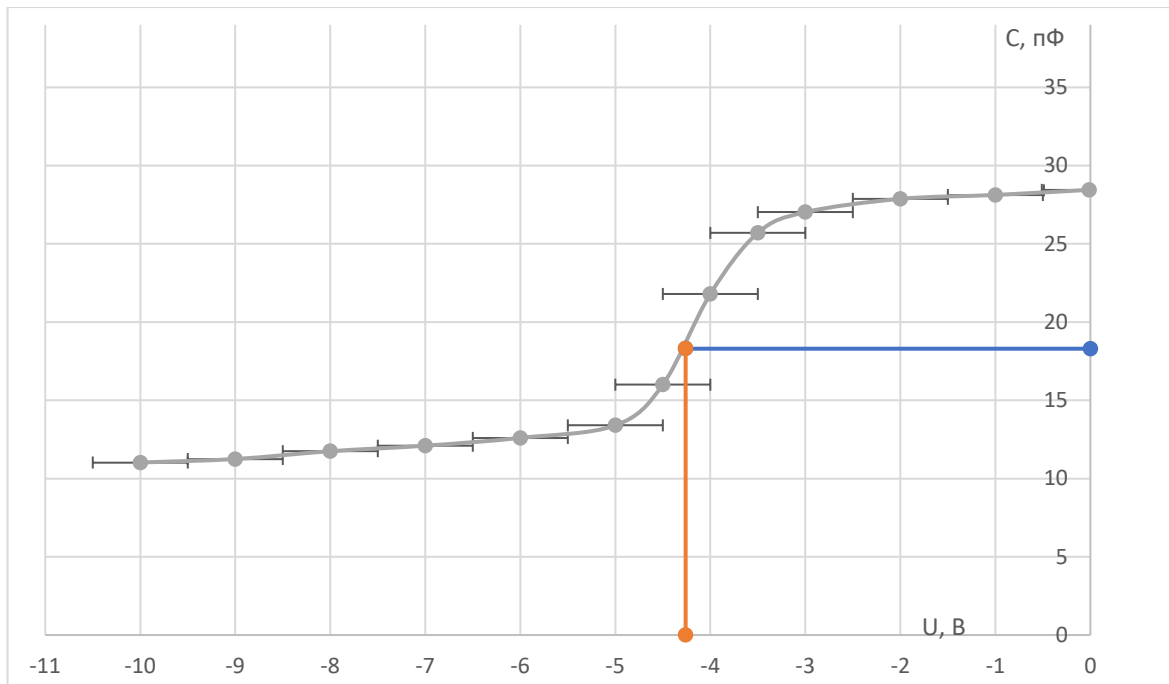


Рис 4.7. Знаходження напруги плоских зон

Маємо:

$$V_{FB} = -4.26 \text{ V} \quad (4.13)$$

При розгляді ідеальної теоретичної характеристики не враховується різниця робіт між напівпровідником та металом, тому:

$$\Delta V = V_{\text{теор}} - V_{\text{екс}} - \Delta\varphi_{ms} \quad (4.14)$$

Знайдемо різницю напруг теоретичної і експериментальної ВФХ для того щоб змоделювати розподіл густини заряду на межі діелектрика з напівпровідником.

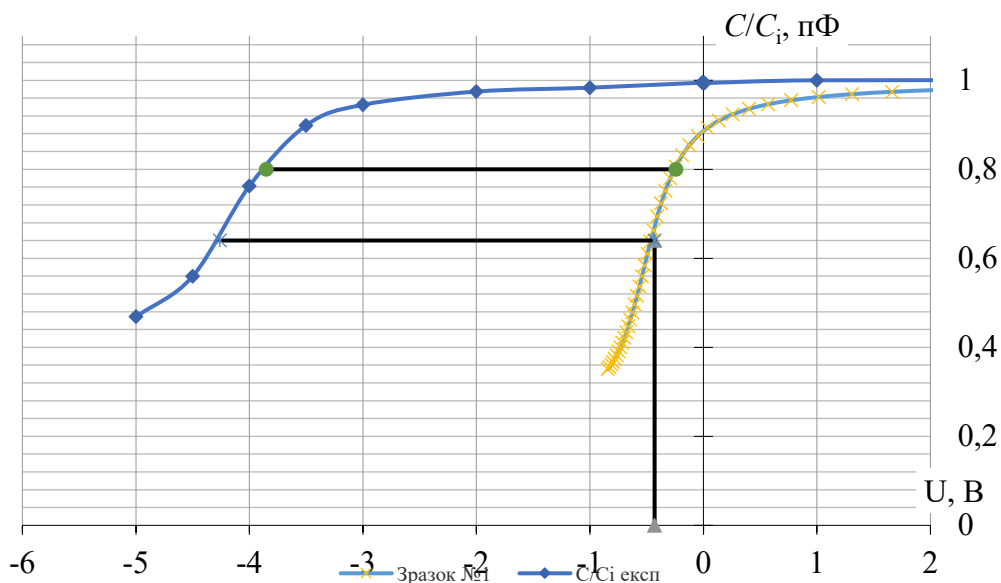


Рис 4.8. Знаходження різниці напруги

Значення параметрів, отриманих даним методом схожі на отримані в класичному розрахунку.

З отриманих даних побудуємо графік залежності різниці напруги від поверхневого потенціалу:

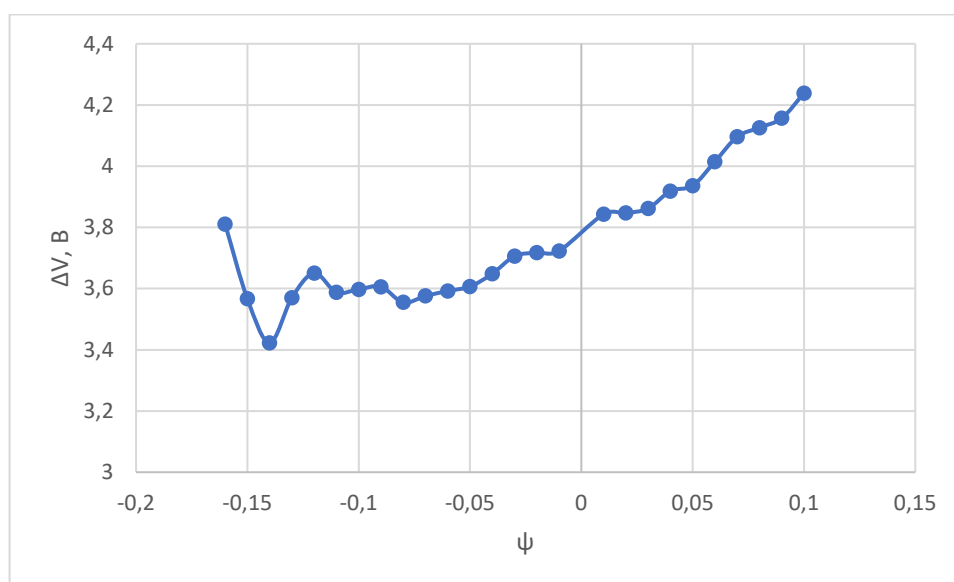


Рис 4.9. Залежність зсуву напруги від поверхневого потенціалу за сталих показників ємності

Розподіл густини заряду на границі розподілу діелектрик-напівпровідник отримаємо за виразом:

$$N_{it}(\psi_s) = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0}{q d_i} \frac{d(V_{\text{екс}} - V_{\text{теор}})}{d\psi_s}. \quad (4.15)$$

Отримаємо:

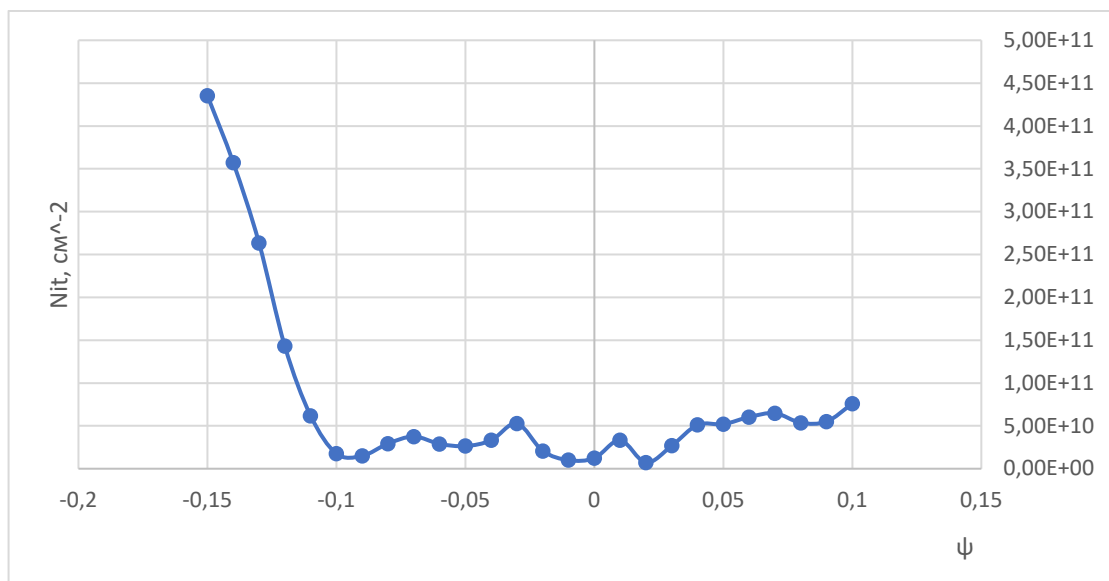


Рис 4.10. Розподіл густини заряду на границі діелектрик-напівпровідник

### 4.3. Знаходження основних параметрів МНД-структури без застосування теоретичних кривих

Даний метод є деяким вдосконаленням методу Термана. Розроблений метод дозволяє з меншими похибками визначити напругу та ємність плоских зон за рахунок того, що для їх знаходження не використовується теоретичних кривих, а усі розрахунки залежать лише від досліджених даних. Дослідимо основні параметри МДН-структури за допомогою цього методу:

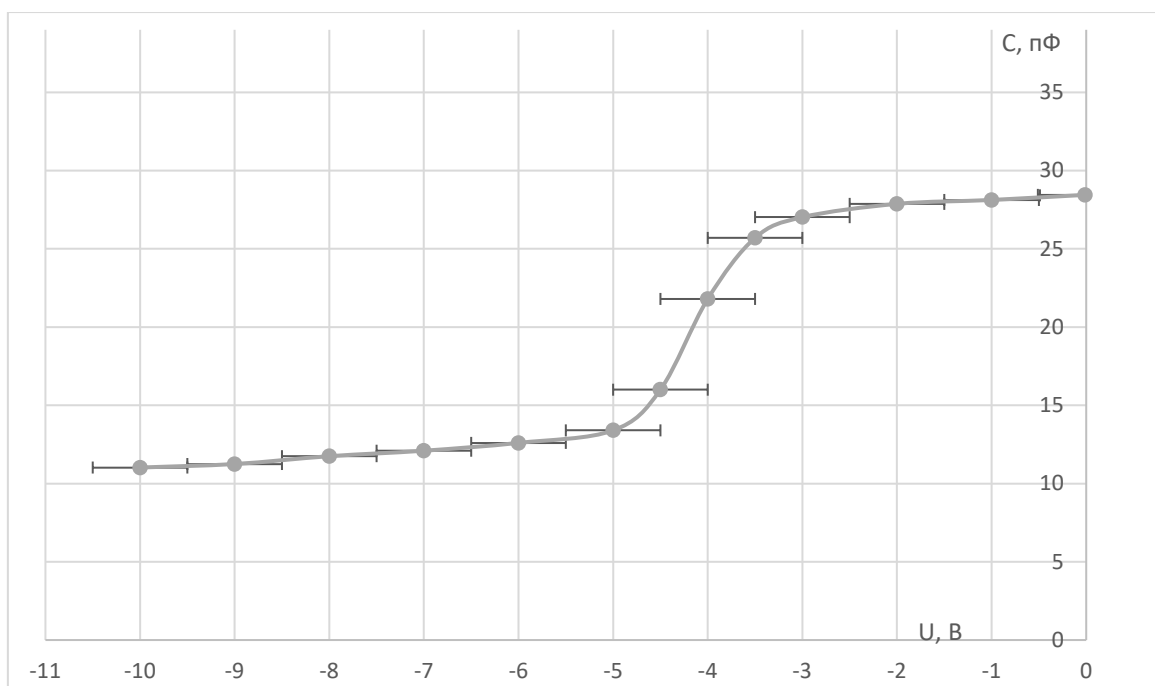


Рис 4.11 Експериментальна ВФХ

Для знаходження напруги плоских зон скористаємося раніше отриманими даними та формулою повної ємності МДН-структури (формула 1.10). Побудуємо обернену квадратну залежність ємності ОПЗ напівпровідника від напруги, прикладеної до структури. На лінійній області такої характеристики проведемо дотичну до пересічення з віссю напруги. Таким чином ми визначити напругу плоских зон:

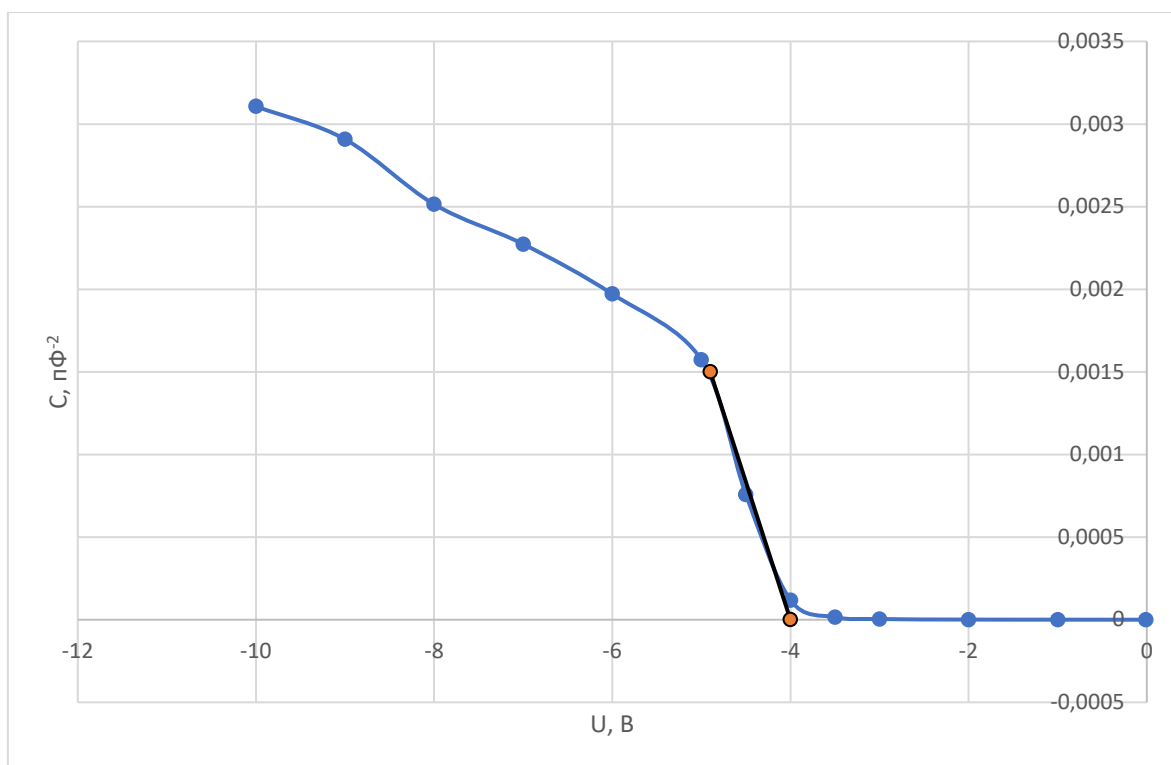


Рис 4.12. Знаходження напруги плоских зон на залежності оберненого квадрату ОПЗ від напруги

З графіку маємо:

$$V_{FB} = -4 \text{ В} \quad (4.16)$$

Проведемо знайдену напругу плоских зон на експериментальну ВФХ для знаходження ємності плоских зон:

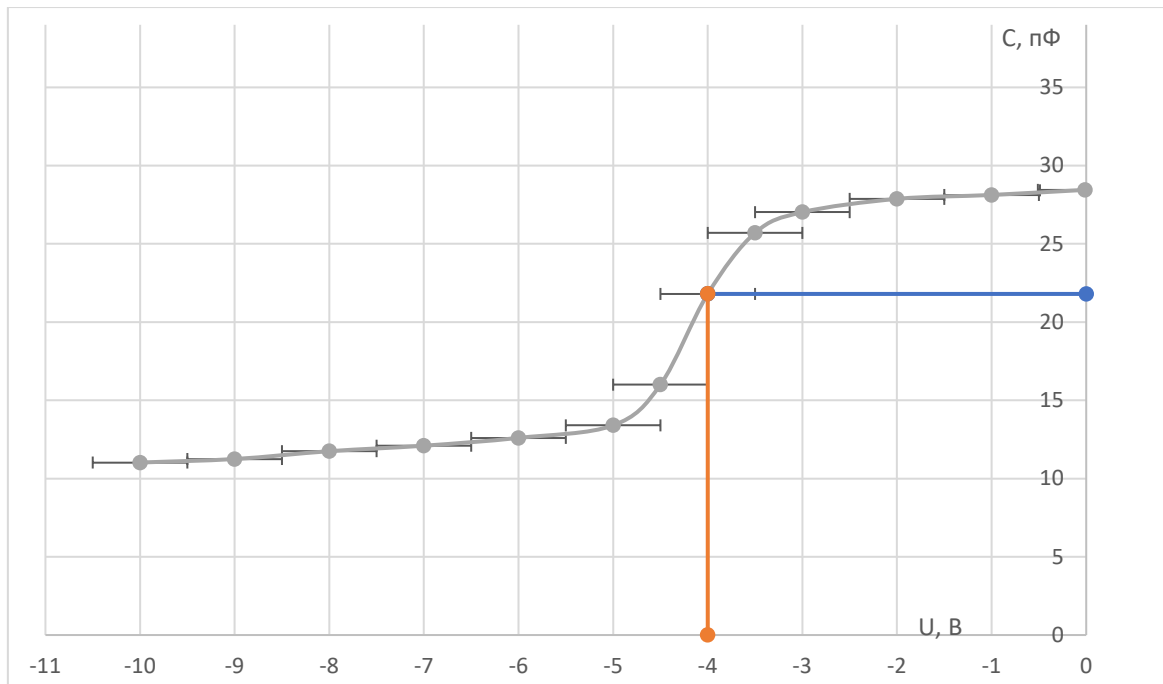


Рис 4.13. Знаходження ємності плоских зон

З графіку маємо:

$$C_{FB} = 21,8 \text{ пФ} \quad (4.17)$$

По отриманим даним ємності та напруги плоских зон можна зробити висновок, що всі методи були застосовані правильно, адже результати досліджень приблизно однакові, що може свідчити лише про різну точність методів.

Як і в методі Термана, побудуємо розподіл густини заряду на межі діелектрик-напівпровідник. Для цього скористаємося формулою знаходження залежності ємності ОПЗ від напруги на МДН-структурі (формула 3.3). Отримаємо наступні криві для порівняння:



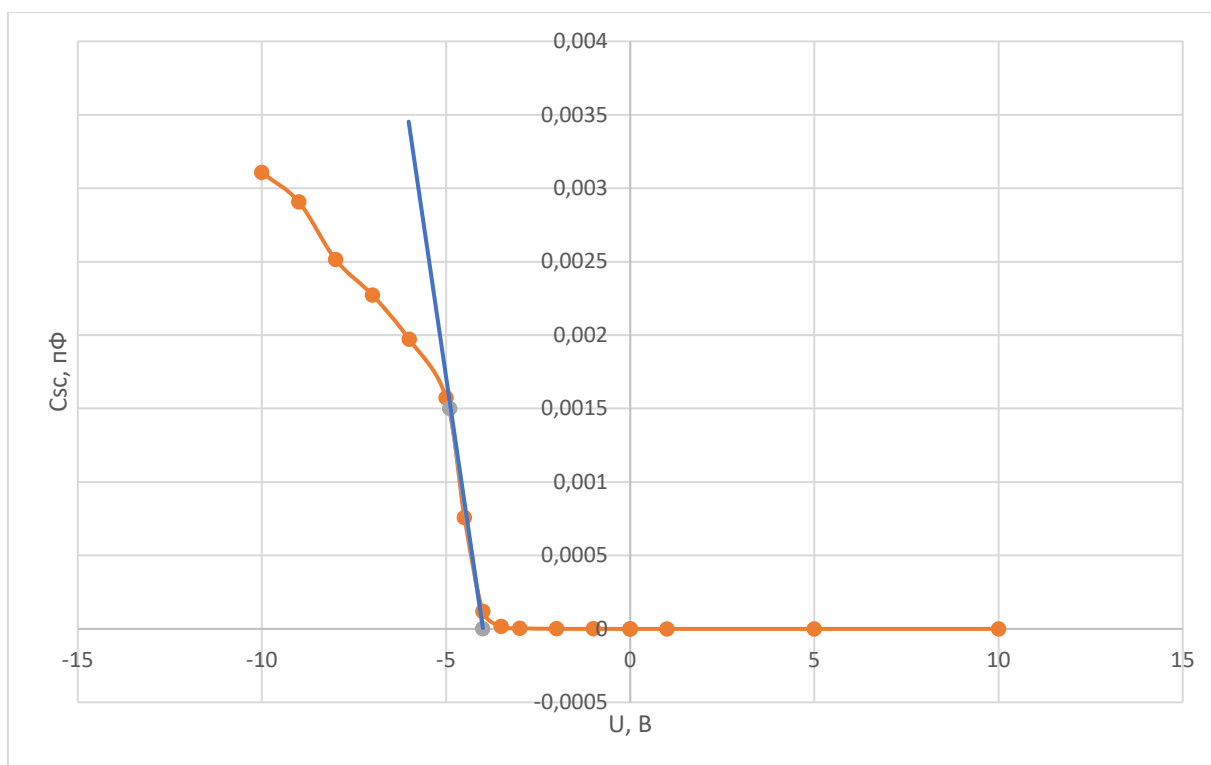


Рис 4.14. Залежність ємності ОПЗ від напруги

Проаналізувавши отримані дані, побудуємо розподіл заряду на межі діелектрик-напівпровідник:

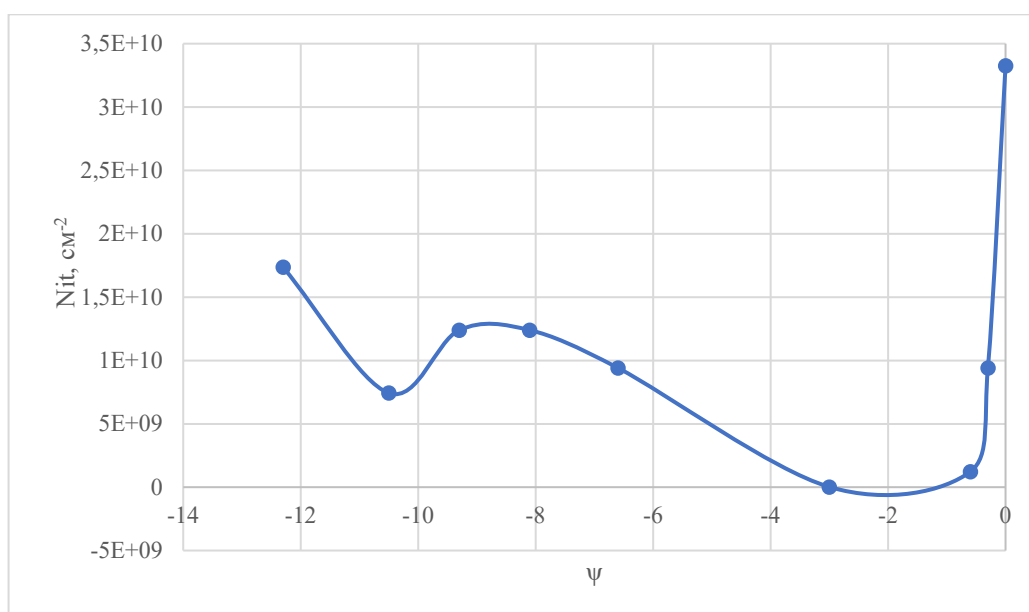


Рис 4.15. Розподіл густини заряду на межі діелектрик-напівпровідник

## ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи було проаналізовано структуру метал-діелектрик-напівпровідник. Зокрема розглянута класична теорія МДН-структур, ефектів які в них відбуваються. Особлива увага надана теорії ємності та впливу зарядових станів на параметри МДН-структур. Був з'ясований вплив поверхневих станів на вольт-фарадну характеристику структури.

Були проаналізовані ВФХ характеристики структури за класичним (теоретичним) , диференційним (метод Термана) методом та способом, що дозволяє не використовувати теоретичні криві. Цими методами було досліджено основні характеристики структури та було змодельована графік розподілу заряду на межі діелектрик-напівпровідник.

За експериментальними вимірами всіма розглянутими методами було досліджено структуру Si-SiO<sub>2</sub>-Al. В ході дослідження була побудована теоретична ВФХ для подальшого порівняння її з експериментальними даними. Схожість результатів експериментів за різними методами запевняють в тому, що дослідження проведено правильно. Розглянуті методи мають свої переваги та недоліки, але метод, що дозволяє розрахувати параметри структури без використання теоретичних кривих є більш точним навіть за метод Термана, тому що він залежить лише від експериментальних даних, отриманих під час експерименту.

В дипломній роботі було проведено зрівняння різних методів визначення електрофізичних властивостей МДН-структур за їх вольт-фарадними характеристиками, експериментально доказано перевагу одного метода над іншим.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1) Зи С. Физика полупроводниковых приборов/ В.А. Гергель, В.В. Ракитина. - М: Мир, 1984. - 456 с.
- 2) Бормонтов Е.Н. Электрофизические методы исследования МДП-структур/ Воронеж : изд-во ВГУ ч.1, 2002. -27 с.
- 3) Гуртов В.А. Твердотельная электроника / 2-е изд. – М.: Техносфера, 2007. – 408 с. - ISBN: 978-5-94836-120-8.
- 4) Королевич Л.М., Борисов О.В. Определение напряжения плоских зон по экспериментальным вольт-фарадным характеристикам МДП-структур / 2019. – 6с. - DOI 10.32838/2663-5941/2019.3-2/37.
- 5) В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников Физика полупроводников / М: Мир, 1977. – 678 с.
- 6) S. Kar. High Permittivity Gate Dielectric Materials / Springer Berlin Heidelberg, New York 2013. – 516 с. - ISBN 978-3-642-36535-5
- 7) Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие / Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
- 8) Chih-Tang Sah Fundamentals of Solid-state Electronics/ World Scientific, ISBN 9810216238. 2010. – 383 с.
- 9) Sze S.M., Ng K.K., Physics of Semiconductor Devices/ Wiley, 2007. – 763 с. - ISBN-10: 0-471-14323-5.
- 10) Горшков А.П., Тихов С.В. ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ: Учебное пособие/ Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 101 с.
- 11) Binghao Wang, Wei Huang, Lifeng Chi, Mohammed Al-Hashimi, Tobin J. Marks and Antonio Facchetti High- $k$  Gate Dielectrics for Emerging Flexible and Stretchable Electronics / ACS publication, 2018. – 65 с. - DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00045
- 12) Salvador Dueñas, Helena Castán, Héctor García and Luis Bailón Electrical Characterization of High-K Dielectric Gates for Microelectronic Devices / InTech, 2012. – 38 с. - DOI: 10.5772/50399.

- 13) Tao Zhu, Meng NanChong «Prospects of metal–insulator–semiconductor (MIS) nanojunction structures for enhanced hydrogen evolution in photoelectrochemical cells» *Nano Energy*, 2015. - 347 - 373.- DOI 10.1016/j.nanoen.2015.01.001
  
- 14) Yumnam, Nivedita; Hirwa, Hippolyte; Wagner, Veit Analytical and numerical analysis of charge carriers extracted by linearly increasing voltage in a metal-insulator-semiconductor structure relevant to bulk heterojunction organic solar cells / *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017. – Vol. 50, № 49.
  
- 15) Королевич Л.М., Борисов О.В., Максимчук Н.В. «Влияние методов получения тонких пленок оксида церия на вольт-фарадные характеристики МДН-структур» / *MicrosystElectronAcoust*, 2019. - Vol. 24, № 3. DOI: 10.20535/2523-4455.2019.24.3.178484.
  
- 16) A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh , V.S. Varavin , S.A. Dvoretiskii , N.N. Mikhailov , M.V. Yakushev , G.Yu. Sidorov. Electrical characterizations of MIS structures based on variable-gap HgCdTe grown by MBE on Si(013) substrates. *Elsievier B.V.* / 2017. – 6 с.- DOI: 10.1016/j.infrared.2017.10.006.
  
- 17) И.И. Зитыков, Л.К. Чиркин, Е.П. Юрченко Расчет МДП-приборов учеб. Пособие / ЛЭТИ. – Л., 1991.- 64 с.
  
- 18) Schroder D.K. *Semiconductor Material and Device Characterization* /3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 2006. – 800с. - ISBN: 978-0-471-73906-7
  
- 19) Przewlocki H., Gutt T., Piskorski K. The inflection point of the capacitance-voltage,  $C(VG)$ , characteristic and the flat-band voltage of metal-oxide-semiconductor structures. *Journal of Applied Physics* / 2014. – 8с. - DOI: 10.1063/1.4880399
  
- 20) E. H. Nicollian and A. Goetzberger The Si-SiO<sub>2</sub> Interface-Electrical Properties as Determined by the MIS Conductance Technique / *Bell Syst. Tech. J.*, 46, 1967. P – 1055-1133 с.